

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

Optimalizace počítačového modelování držáku světlometu při
statickém testu pomocí SW LS-DYNA

Optimization of computer Modeling of Headlamp Holder Failure
During Static Test Using SW-LS DYNA

Student:

Bc. Filip Lužný

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Filip Lužný**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Optimalizace počítačového modelování porušení držáku světlometu při statickém testu pomocí SW LS-DYNA**
Optimization of Computer Modeling of Headlamp Holder Failure During Static Test Using SW LS-DYNA

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Výběr světlometu pro počítačové modelování.
- 2) Kontrola počítačového modelu světlometu.
- 3) Aplikace okrajových podmínek při statickém testu.
- 4) Nastavení parametrů SW LS-DYNA pro potlačení dynamických účinků pro statický test, zejména: velikost sítě MKP, rychlost deformace, modifikace měrné hmotnosti atd.
- 5) Verifikace počítačových simulací měřením podle možností zadavatele.

Seznam doporučené odborné literatury:


- 1) Firemní podklady Varroc Lighting Systems s.r.o.
- 2) <http://www.dynaexamples.com/>
- 3) <http://www.dynaexamples.com/implicit>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Petru Horylovi, CSc., dr.h.c., za podporu, trpělivost a za cenné rady a připomínky.

Děkuji také Ing. Martinu Biskupovi, PH.D. a Ing. Adamu Pilčíkovi, rovněž za cenné rady, připomínky a umožnění vypracování této diplomové práce.

Místo přísězné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o technických parametrech světlometu získaných od společnosti Varroc Lighing Systems s.r.o., společnost s jejich zveřejněním souhlasí.


V Ostravě 16.5.2018

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 16.5.2018


.....
podpis studenta

Bc. Filip Lužný

Bystročice 138, 772 00

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LUŽNÝ, F. Optimalizace počítačového modelování držáku světlometu při statickém testu pomocí SW LS-DYNA: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojním, Katedra mechaniky, 2018, 59 s. Vedoucí práce: HORYL, P.

Diplomová práce se zabývá optimalizací výpočtu ulomení držáku světlometu při statickém testu. V úvodu teoretické části budete seznámeni se stručnou historií vývoje světlometů. Dále bude popsán postup konstrukce a vývoj světlometů. Na závěr teoretické části bude popsán samotný světlomet a jeho hlavní části z hlediska strukturálních výpočtů. Cílem práce je optimalizovat výpočet a potlačit dynamické jevy za pomoci úpravy velikosti sítě, následné úpravy rychlosti deformace a modifikace měrné hmotnosti. Výsledkem práce bude návod jak optimalizovat výpočet pro dosažení co nejpřesnějšího průběhu ulomení držáku světlometu za co nejkratší výpočetní čas.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

LUŽNÝ, F. Optimization of computer Modeling of Headlamp Holder Failure During Static Test Using SW-LS DYNA. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics 2018, 59 s. Thesis Head: HORYL, P.

Diploma thesis deals optimizing calculation to break off the headlamp holder during a static test. In the introduction, a theoretical part, you will learn about the brief history of headlamp development. Next will describe the procedure for the construction and development of headlamps. At the end of the theoretical part will be described the headlam itself and its main part in terms of structural calculations. The aim of the thesis is to optimize the calculation and suppress dynamic effects with editing mesh size, subsequent deformation rate modification, and specific weight modification. The result of the work will be how to optimize the calculation to achieve the most accurate breaking behavior of the holder for the shortest calculation time.

Obsah

1.	Výběr světlometu pro počítačové modelování	8
1.1	Varroc Lighting Systems, s.r.o.	8
1.2	Historie světlometů	9
1.3	Konstrukce a vývoj světlometu	12
1.4	Přední světlomet a jeho části	15
1.5	Volba světlometu	16
2.	Aplikace okrajových podmínek při statickém testu	17
2.1	Tvorba sítě konečných prvků	17
2.2	Nastavení okrajových podmínek	22
2.3	Kinematické buzení	24
2.4	Kontakty	25
2.5	Materiálové parametry	27
3.	Optimalizace výpočtu	29
3.1	Implicitní algoritmus	30
3.2	Explicitní algoritmus	31
4.	Velikost sítě MKP	33
4.1	Vyhodnocení úpravy sítě	35
5.	Optimalizace rychlosti deformace	42
5.1	Vyhodnocení snižování rychlosti	44
6.	Modifikace měrné hmotnosti - úprava výpočetního kroku	49
6.1	Vyhodnocení výpočetního kroku	50
7.	Závěr	53
8.	Seznam použité literatury	59

1. Výběr světlometu pro počítačové modelování

1.1 Varroc Lighting Systems, s.r.o.

Zadavatelem této diplomové práce je společnost Varroc Lighting Systems, s.r.o., která vznikla v roce 2012 jako subjekt skupiny Varroc Group, která se zabývá vývojem a výrobou osvětlení pro automobilový a motocyklový průmysl. Historie se začala psát už více, než před 100 lety kdy Josef Rotter založil, v Novém Jičíně dílnu s názvem Joro na výrobu lamp pro kočáry. Dále firma působila pod názvem Autopal, následně společnost Ford Motor Company založila Visteon Corporation, která sjednotila všechny závody Autopal. Od roku 2012 působí firma pod názvem Varroc Lighting Systems, s.r.o., vlastněný subjektem skupiny Varroc Goup, která působí na třech kontinentech. [1]



Obr. 1 Logo Varroc Lighting Systems [1]

V České republice firma působí ve třech městech, kde má jak výrobní závody, tak vývojová centra. Největší z nich se nachází v Novém Jičíně které, je jak výrobním závodem, tak zároveň i vývojovým centrem. Dalším městem je Ostrava, kde je pouze vývojové centrum a posledním je Rychvald, kde je naopak pouze výrobní závod.

Mezi zákazníky této společnosti patří jedny z největších automobilových firem na světě jako jsou Ford Motor Company, koncerny JRL (Jaguar, Land Rover), PSA tedy Peugeot a Citroën, Opel, VW Group včetně Škody a Bentley. V posledních letech se firma snaží prosadit na trhu jednostopých vozidel kde může čerpat z dlouholetých zkušeností z výroby světlometů.

1.2 Historie světlometů

V uplynulých letech jsme mohli zaznamenat velmi rychlý rozvoj techniky a vědy obecně. Tento proces má za následek rychlý rozvoj všech vědních oborů a nástup nových technologií napříč všemi obory. Žijeme v tzv. době Průmyslu 4.0, kde dochází k digitalizaci a s ní související automatizaci výroby a automobilový průmysl nezůstává pozadu a v něm je určitě zakomponovaný světelný průmysl. Světlo už není složeno pouze z obyčejné žárovky či snad svíčky ale je to složitý celek svázaný normami a požadavky zákazníka.

Vůbec prvními světly, byly acetylénové lampy, které však nebyly moc efektivní a více svítily do prostoru místo na cestu. Tyto lampy fungovaly na principu hoření acetylénu nebo petroleje, který vydával plamen, za kterým bylo zrcadlo, které směřovalo světlo do prostoru před automobil nikoliv na cestu.



Obr. 2 Acetylénové lampy [3]

Počátkem 20. století se začaly používat tzv. elektrická světla, která využívala pro svícení klasické žárovky s wolframovým vláknem. Z počátku zabráňovalo rozšíření těchto světel neznalost, jak vyrobit dostatečně malé dynamo na to, aby bylo možné jej použít v autě, a dost velké na to, aby „uživilo“ proudem žárovku.

Postupným vývojem došlo k naplnění wolframových žárovek inertním plynem a vznikl další typ žárovek. Tyto žárovky dali za vznik tzv. halogenovým světlometům, využívají pro svícení halogenové žárovky. Tyto žárovky fungují na principu průchodu elektrického proudu wolframovým vláknem, které je jeho účinky rozžhaveno. Žárovky bývají nejčastěji naplněny inertním plynem, díky kterému žárovka svítí mnohem jasněji a déle vydrží. Tento typ je velmi oblíbený i v dnešní době, a to z důvodu ceny a bezporuchového provozu. Proto je možné je ještě najít i dnes ve většině nových automobilů.



Obr.3 Halogenové světlo [4]

Další používaný typ světel v dnešních automobilech jsou Výbojkové (Xenonové) světlomety. Tyto světlomety jsou označovány jako HID (High Intensity Discharge), v překladu výboj s vysokou intenzitou. Světlo vzniká při řízeném výboji v plynné náplni mezi dvěma elektrodami, kde vznikne elektrický oblouk, který je třeba „nastartovat“, proto tyto systémy mají startéry, které při zapnutí světel vygenerují vysoké napětí v rozmezí 18000-30000 V a tím oblouk uvedou v chod. Dále již světlomet pracuje při konstantním výkonu 25 nebo 35 W. Elektrody jsou umístěny ve skleněné trubičce naplněné inertním plynem, xenonem. Odtud má také tenhle typ osvětlení svůj název – xenonová světla. Oproti halogenovým žárovkám svítí mnohem silněji za stejné spotřeby energie, takže výbojky mohou být menší a energeticky úspornější, aby svítily stejně intenzivně. Nevýhodou je, že tyto světlomety jsou již z hlediska konstrukce mnohem složitější a rapidně narůstá celková hmotnost i cena.



Obr.4 Xenonové světlo [4]

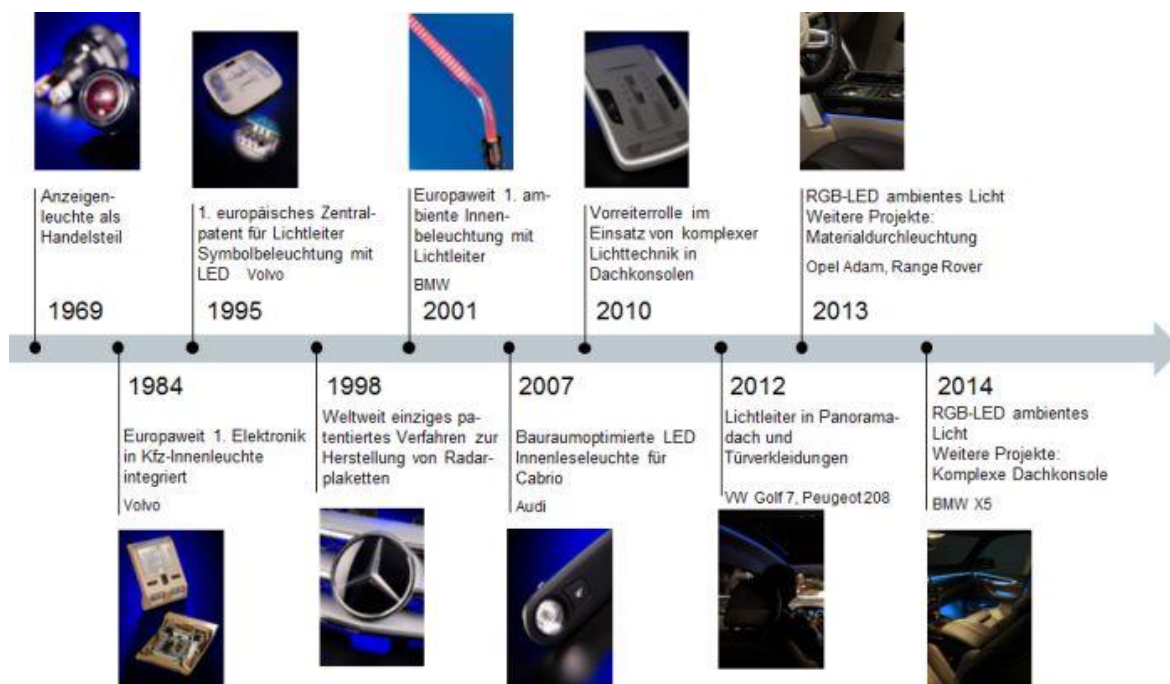
Do nejmladší skupiny světel patří Led světla, která jsou pořád ještě relativní novinkou. Zdrojem světla je LED dioda fungující na principu polovodičových destiček přetvářejících elektrický proud přímo na světlo. Led světla jsou ještě efektivnější, než Xenonové výbojky z důvodu, že dovedou svítit ještě intenzivněji, vydrží ještě delší dobu a spotřebovávají méně energie. Velkou nevýhodou je problém že dochází k velkému zahřátí a jejich čipy se přehřívají, pokud jsou hodně silné, např. pro potkávací nebo dálková světla, z tohoto důvodu potřebují chlazení.



Obr. 5 Diodové světlo [4]

Poslední a nejmodernější technologií osvětlení jsou Laserová světla. Fungují na principu jednoho laserového modulu, který obsahuje tři nebo čtyři vysokovýkonné laserové diody. Modul soustředí svazky paprsků intenzivního modrého laserového světla. Fosforový konvertor následně přeměňuje nepříjemné modré světlo na čistě bílé. Laserová světla mají spoustu značných výhod jako dlouhý dosvit, až 2x více jak led světla a nejpřirozenější světlo

bílé barvy. Životnost by měla odpovídat plánovanému životnímu cyklu celého automobilu. Další předností laserových světlometů je nižší energetická náročnost. Laserové světlometry si navíc vystačí s ještě menšími zástavbovými rozměry než diody, což je velmi výhodné pro konstrukci. Bohužel jsou tu zase i nevýhody – a to vyšší cena a produkce více tepla. Rozsah použití je zatím rozšířen pouze pro dálková světla, protože jejich paprsek není možné tak přesně směřovat, jak to jde u Led světél.



Obr. 6 Vývoj světlometů v čase [5]

1.3 Konstrukce a vývoj světlometu

Výroba světlometu je velmi složitý proces navzájem na sebe navazujících operací a vývoj finální verze světlometu trvá několik desítek měsíců. Vývoj světlometu můžeme rozdělit na 2 hlavní části.

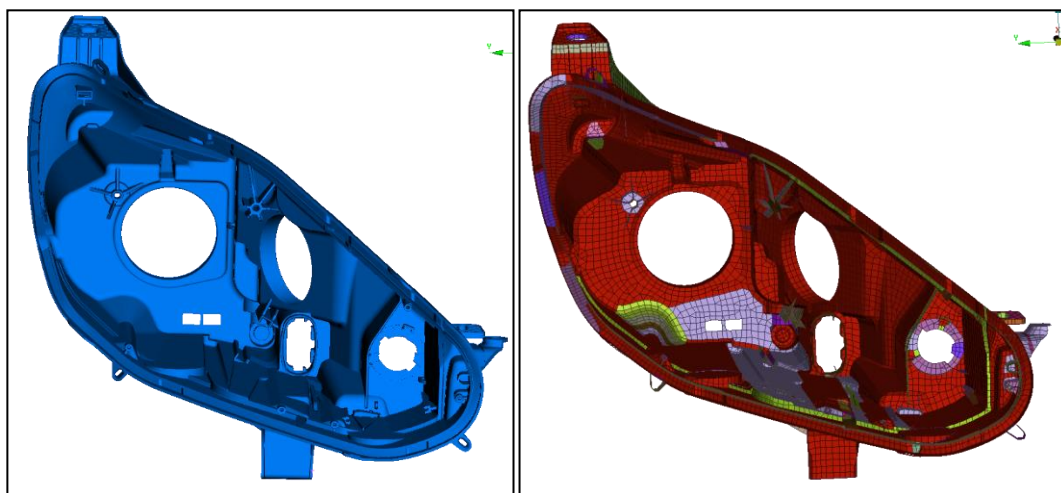
Prvním krokem je návrh designu světlometu dle zadání zákazníka. Designér vytvoří hrubý tvar světlometu s jeho vybavením odpovídajícím zástavbě automobilu. Při vytváření designu je nutno zohlednit výrobitelnost daných dílů jako jsou různé krytky, clonky, ozdobné rámečky, malá žebra či rádiusy, které by byly obtížné či velmi nákladné pro následnou sériovou výrobu. Světlometry z velké části utváří design auta, který může zákazníka nadchnout či naopak odradit. Proto cíl designéra je udělat co nejhezčí světlo které zaujme ale zároveň bude mít i nízké náklady na výrobu.



Obr. 7 Před vývoj světlometu [5]

Pokud firma vyhraje zakázku a světlomet projde schválením zadavatele, můžeme pokračovat v dalším postupu konstrukčních prací, kde se ladí jednotlivé díly světlometu a vzájemně se upravují jejich prostorové tvary dle potřeb zákazníka, funkčnosti a výrobitelnosti. Jakmile je hotov první prototyp světlometu, který odpovídá zástavbě automobilu tak i světelnému konceptu, je provedena CAE Simulace.

Simulace jsou prováděny ve výpočetních centrech buď přímo ve firmě, nebo externě. Simulace jsou rozděleny na dvě části kde první je zaměřena na teplotní ovlivňování vlivem zdroje světla a také na kondenzaci a dekonkondenzaci uvnitř světlometu. Druhá část simulací je zaměřena na mechanické vlastnosti daného světlometu. U mechanických vlastností se zaměřujeme na zjištění vlastních frekvencí, určení tuhosti struktury a také simulací nárazové zkoušky.

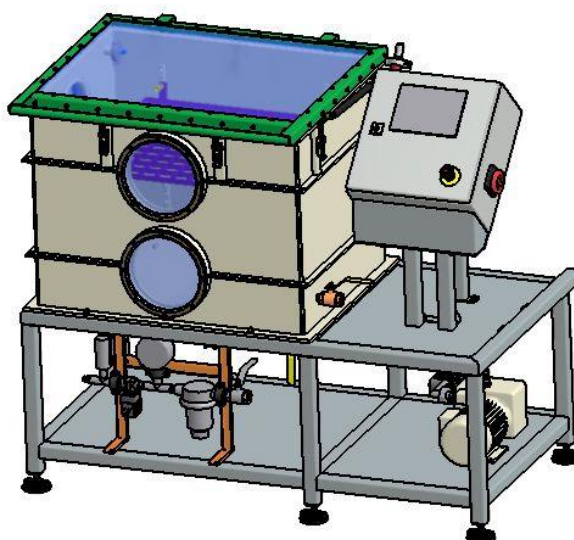


Obr. 8 CAD model světlometu a po vytvoření MKP sítě

Prototyp prakticky nikdy nevyhoví, a proto po provedení všech simulací se vrací návrh ke konstruktérovi a optikům a dle doporučení výpočtáře je prototyp optimalizován a upraven tak aby splňoval všechny podmínky zákazníka a legislativy.

Po dosažení finální podoby světlometu dochází k zadání výroby vstřikovacích forem a nástrojů, přípravy výroby a následně se rozběhne sériová výroba. Zároveň se vyrobí sada prototypů a to např. pomocí silikonové formy nebo CNC obráběním z hliníku. Tyto prototypy jsou podrobeny experimentálním zkouškám. Tyto zkoušky se provádějí ve speciálních komorách, kde se simuluje provoz v reálném prostředí dle podmínek, ve kterých bude automobil používán.

Ověřuje se těsnost a chování světlometu při různých teplotách a vlhkostech vzduchu. Dále se zjišťuje míra kondenzace a její následná dekondenzace. V dalších zkouškách, je světlomet umístěn na vibrační stůl. Výsledky těchto zkoušek musí korespondovat s vypočtenými výsledky a požadavky zákazníka.



Obr. 9 Testovací komora světlometu [5]

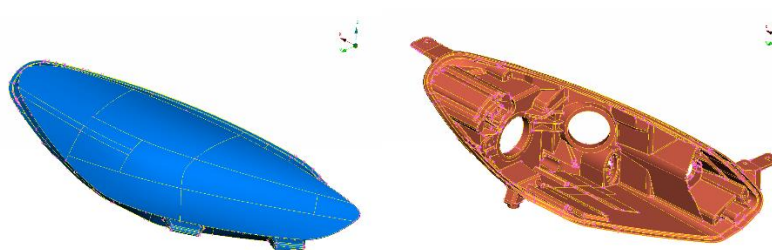
V této fázi se ještě zapracovávají jednotlivé změny, většinou drobného charakteru, jedná se např. o zpevňující žebra na tělese, úpravy úkosů a zaoblení hran. Designové díly zůstávají většinou beze změn. Schválením a spuštěním výrobního procesu je vývoj samotného světlometu ukončen.

1.4 Přední světlomet a jeho části

Konstrukčně je světlomet složitý celek více částí, které pro správnou funkčnost musí být vyrobeny v přesných tolerancích, aby do sebe zapadaly a vytvořily jeden celek. Díly jednotlivých světlometů se mohou velmi lišit v závislosti na specifikaci, která se odvíjí od ceny daného světlometu, respektive automobilu. V zásadě lze konstrukční zástavbu rozdělit do tří částí.

Plášť

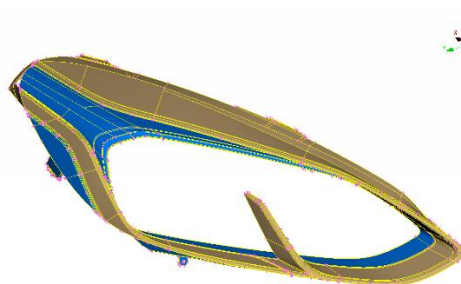
Plášť se skládá ze dvou částí, a to z pouzdra světlometu a krycího světla. Pouzdro vyplňuje zástavbový prostor automobilu. Na tomto dílu bývá v průběhu navrhování nejvíce změn. Jsou zde umístěny packy, pomocí nichž je světlomet upevněn v automobilu. Tento díl nese veškeré vnitřní i vnější díly světlometu jako jsou elektronika, elektromotory, reflektory, řídicí jednotku, chladiče odvětrání atd. Druhou částí je krycí sklo, které je s pouzdem spojeno buď „nacvaknutím“ či přilepením.



Obr. 10 plášť světlometu

Designové díly

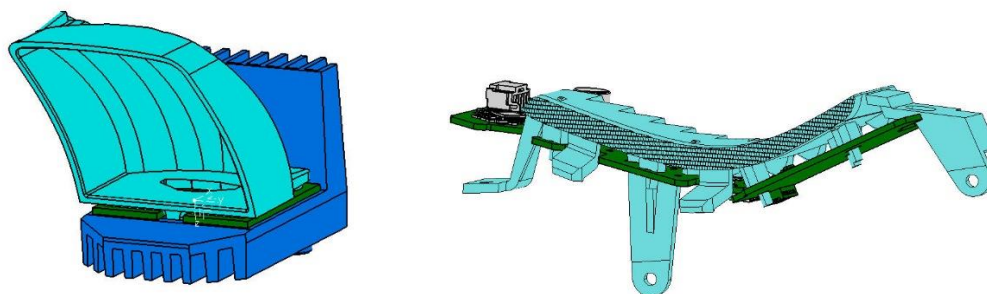
Do této skupiny patří různé lisované rámečky, tubusy a dekorativní lišty. Jelikož auta z velké části prodává jejich design je nutné modelovat tyto prvky.



Obr. 11 Designové díly

Funkční součásti

Tyto součásti zajišťují správnou funkci světlometu jako je směr světelného kuželu, intenzita světla a v případě moderních AFS světlometů také správné natáčení čočky či celého modulu. Jedná se o reflektory, projektory, tvarované čočky či moduly, souhrnně nazýváno optické systémy. Dále zde mohou být řídicí jednotky či chladiče.



Obr. 12 Funkční díly

1.5 Volba světlometu

Volba světlometu byla úzce spojena s tzv. RCAR protokolem. RCAR protokol se zabývá testováním. Konkrétně testováním při nízké rychlosti nárazu do 15km/h. Tento předpis má umožnit zejména snížení nákladů oprav prováděných na vozidlech po nárazu za nízké rychlosti. Popisuje přípravu dílů pro test a průběh testu. Nárazová zkouška slouží k ověření požadovaných vlastností a k hledání a ověřování nových konstrukčních řešení v dané problematice. V tomto případě je výpočet zaměřen na ulamování držáku světlometu.

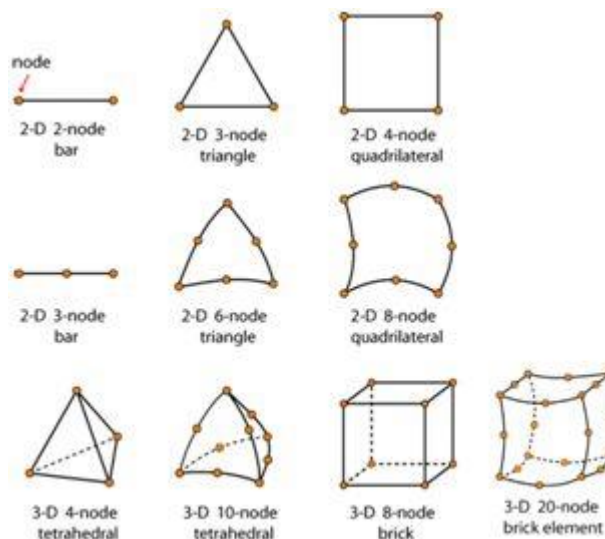
2. Aplikace okrajových podmínek při statickém testu

2.1 Tvorba sítě konečných prvků

V této části se zaměříme na tvorbu konečno prvkové sítě a s tím spojenou volbu tvaru, počtu a velikosti elementů. Konečno prvková síť byla vytvořena v SW Ansa. Tento SW má kvalitně a logicky propracované prostředí pro vytvoření konečno prvkové sítě. Vytvoření správné sítě je jedním z nejdůležitějších kroků výpočtu a proto je velmi důležité provést tento krok velmi pečlivě. Vytvoření sítě závisí výhradně na citu a zkušenosti výpočtáře, jelikož nejsou přesně daná obecná kritéria a existují pouze některá doporučení. Jedním z hlavních faktorů je volba typu a velikosti jednotlivých elementů, tento krok je zásadní zejména z důvodu prodloužení či zkrácení výpočetního času. Pokud budeme zbytečně zjemňovat nepodstatná místa nebo naopak použijeme velmi hrubou síť, může dojít k velkému nárůstu výpočetního času nebo nedosáhneme kvalitního výsledku. Po vytvoření sítě následuje její kontrola přípustnosti tvaru dle stanovených kritérií. Existuje mnoho způsobů, které program Ansa nabízí.

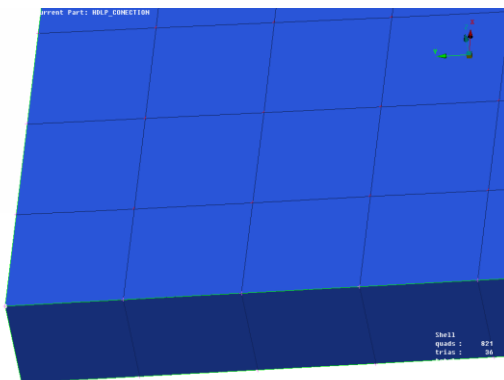
V prostředí SW Ansa postupujeme následovně. Na modelu se vytvoří nejprve povrchová síť, která by měla co nejlépe popisovat danou součást. Čím pečlivější budeme v tomto kroku, tím kvalitnější bude objemová síť. Povrchová síť musí také splňovat požadovaná kritéria kvality. Z takto vytvořené povrchové sítě se následně vygeneruje síť objemová. Tento postup je užitečný zejména z toho důvodu, že u většiny součástí dochází k největšímu namáhání na povrchu.

Při vytváření sítě postupuje následovně, nejprve zvolíme daný typ elementu. Mezi nejpoužívanější patří trojúhelníkové, čtyřúhelníkové nebo mnohoúhelníkové elementy. V ideálním případě je tvořená síť dána pouze jedním druhem elementu, takto vytvořená síť nám přinese zpřesnění výsledku. Tento postup je v praxi často nemožný a to jak z časových důvodů tak i z důvodu, že vytvořit takovou síť zabere mnohem více času. Velmi často nelze danou součást jedním typem elementu popsat.

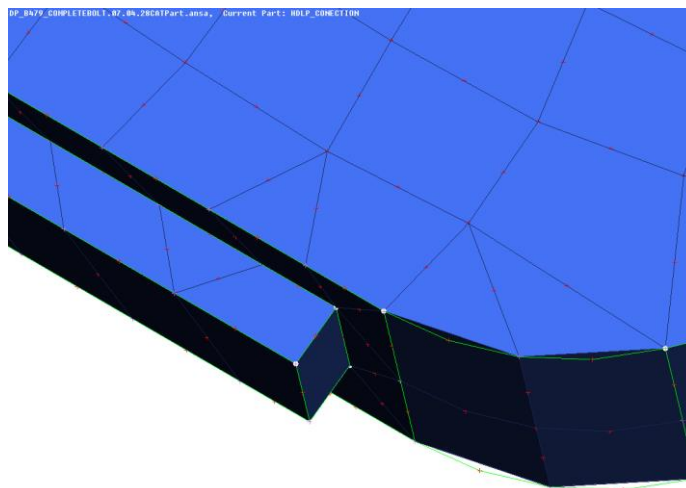


Obr. 13 Druhy konečných prvků

Dalším důležitým parametrem sítě je počet uzlů daného prvku. V daných uzlech elementu dostaneme prvotní informace jako je deformační posunutí. U základního typu elementu jsou uzly pouze v rozích. Z důvodu zpřesnění výsledků se používají prvky s meziuzlem, kde vznikne další uzel na hraně elementu. Přidáním meziuzlu dojde ke zpřesnění výsledků, ale také nárůstu výpočetního času, proto je důležité pracovat s meziuzly velmi pečlivě a nepřidávat je tam kde to není nutné.

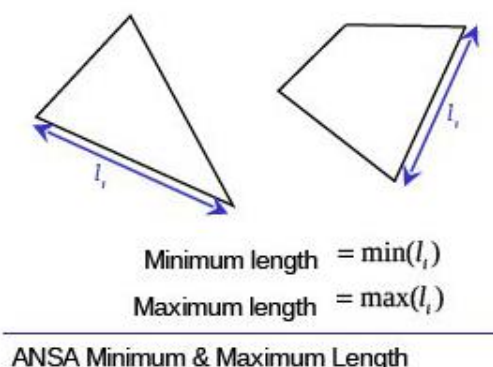


Obr. 14 Sít' tvořena jedním typem elementu bez meziuzlu

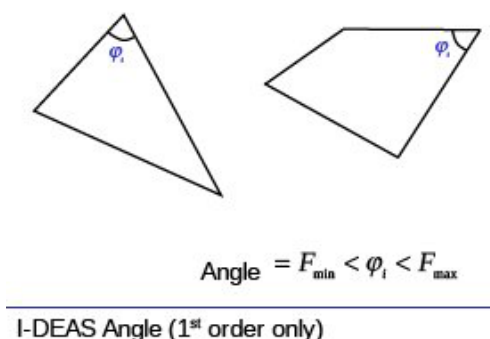


Obr. 15 Síť tvořená různými elementy s meziuzlem

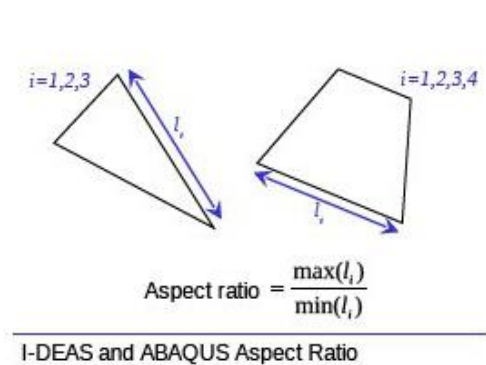
Kritéria kvality sítě se stanovují dle daného typu výpočtu. Záleží na tom, zda se jedná o teplotní, modální či strukturální výpočty. U strukturálních výpočtů se nastavuje několik kritérií a to jak pro povrchovou, tak pro objemovou síť. U povrchové sítě kontrolujeme maximální a minimální hodnoty délkových rozměrů elementu, dále hodnoty související s velikostí elementu tzv. Aspect ratio, které kontroluje poměr délkových rozměrů elementu. Minimální a maximální povolené hodnoty úhlových rozměrů, které jsou přípustné pro každý element. Počet integračních bodů hlídá parametr Jacobian. Předposledním kritériem je tzv. Skewness, které kontroluje nejmenší úhel mezi vektorem z každého uzlu na protilehlý střed a vektor mezi dvěma sousedními středy na každém uzlu prvku. Poslední kritérium pro povrchovou síť je tzv. Crash time step, který ovlivňuje délku výpočtu a je spojen s poměrem délek stran elementů.



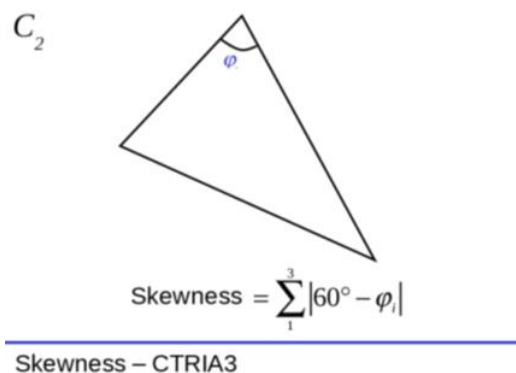
Obr. 16 Kritérium délkových rozměrů u plošných elementů [5]



Obr. 17 Kritérium úhlových rozměrů u plošných elementů [5]

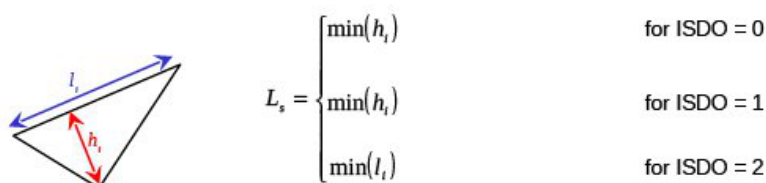


Obr. 18 Kritérium poměrů délkových rozměrů plošných elementů [5]



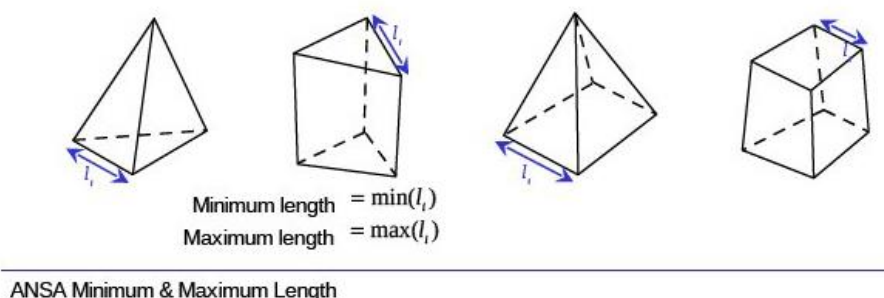
Obr. 19 Kritérium odchylky meziuzlu u plošných elementů [5]

Shell Elements Crash Time Step:

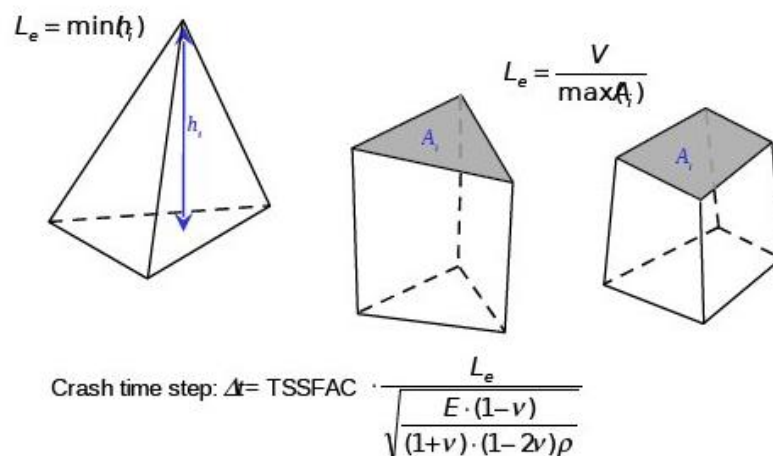


Obr. 20 Kritérium délku výpočtu spojenou s kvalitou elementu

Pro objemovou síť stejně jako u povrchové síť nastavujeme minimální a maximální délkové a úhlové rozměry. Dalším parametrem je tzv. Jacobian, toto kritérium souvisí s počtem integračních bodů. Stejně jako u povrchové síť je hlídán Crash Time step, který i zde ovlivňuje délku výpočtu a je spojen s poměrem délek stran elementů. Další problém, který může vzniknout, jsou Incomplete elementy u kterých je špatně vytvořený uzel nebo nevznikl mezi uzly. Zda jsou uzly správně orientovány hlídá Left Handed. Posledním důležitým parametrem aby bylo možné výpočet spustit bez komplikací je Negative Volume, který kontroluje vznik nežádoucích objemů.

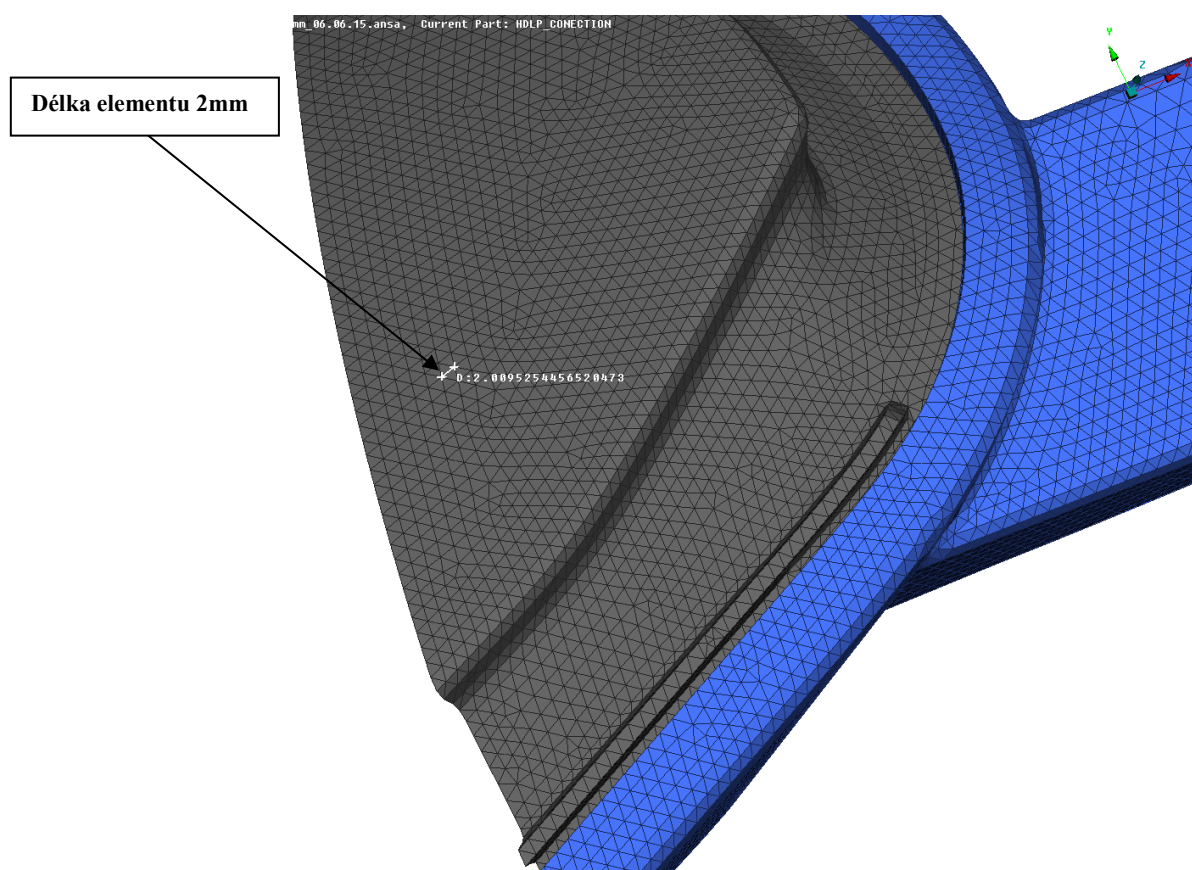


Obr. 21 Kritérium délkových rozměrů u objemových elementů [5]



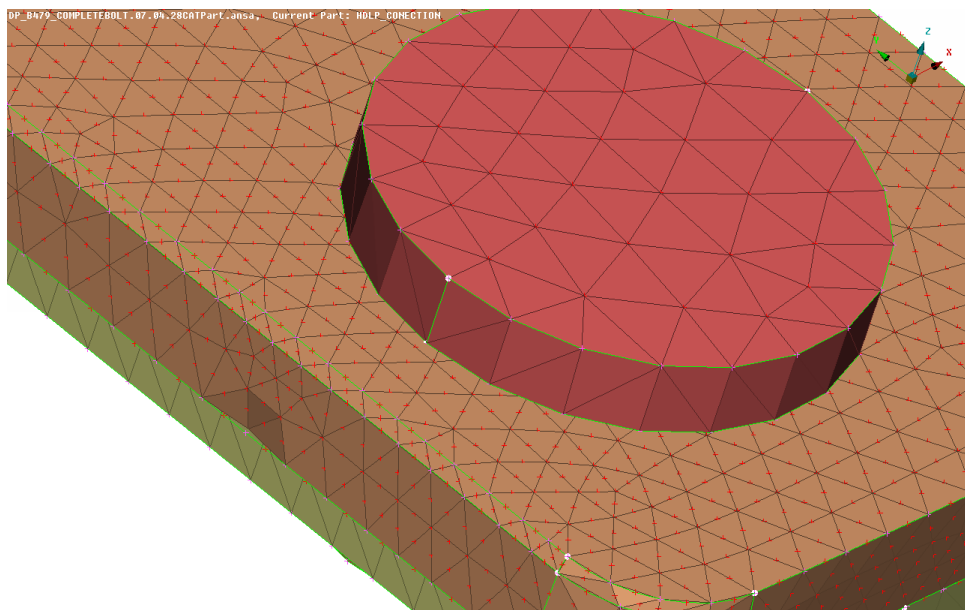
Obr. 22 Kritérium délky výpočtu spojenou s kvalitou elementu (crash)

V této diplomové práci byly užity pro tvorbu sítě elementy tvaru tetraedru. Tyto elementy byly voleny s ohledem na složitost součásti. Velikost elementu byla prvotně pro celou součást nastavena na 2 mm. V další kapitole bude tato velikost sítě dále upravována v rámci optimalizace výpočtu.



Obr. 23 Vytvořená síť na modelu

Jelikož je cílem získat primárně výsledky v oblasti pouzdra světlometu byly pro tuto součást užity tetraedry s meziuzly a pro simulovanou část auta a šroubu bez meziuzlů.



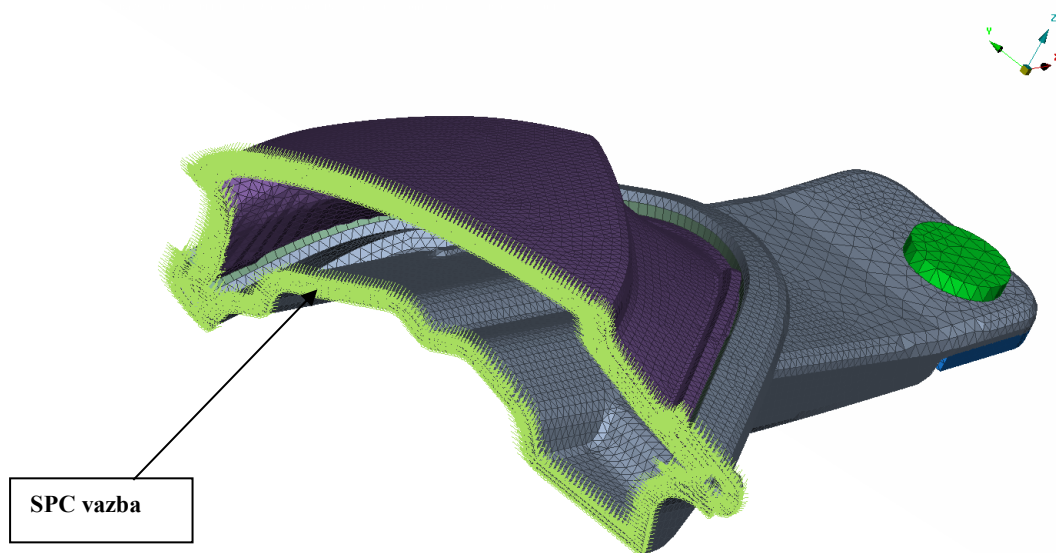
Obr. 24 Detail sítě

Kritéria kvality povrchové sítě byly nastaveny dle kritérií pro strukturální výpočty firmy Varroc a to takto: min. a max. délka elementu 0.5 – 5 mm, poměr délek stran 8, úhel min. a max., 45°- 135°, hodnota Jacobianu je 0,7, kritérium Crash time step je nastaveno na hodnotě 0.0001. Pro objemovou síť byly zvoleny následující kritéria: Crash time step 0.00008 a hodnota Jacobian je shodně jako u povrchové sítě 0.7.

2.2 Nastavení okrajových podmínek

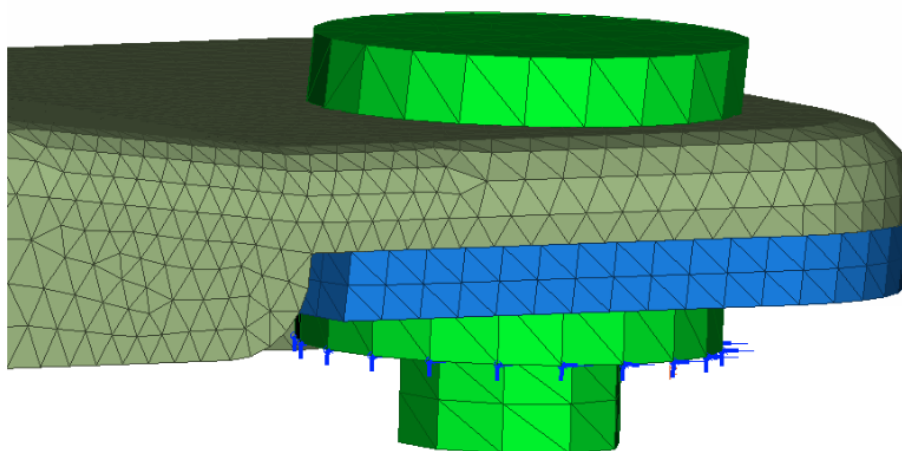
Abychom dosáhli co nejpřesnějších výsledků, je velmi důležité správně zadat okrajové podmínky a vytvořit kontakty tak aby co nejlépe popisovaly skutečné zatížení a uložení. Tímto krokem můžeme výrazně ovlivnit přesnost výsledků. Pokud chybně nahradíme uchycení nebo nesprávně zadáme síly, model bude nejspíše fungovat, ale je jasné, že výsledky nebudou odpovídat skutečnosti. Rozlišujeme dva druhy okrajových podmínek a to geometrické, které předepisují geometrickou vazbu tělesa s jeho okolím a silové okrajové podmínky, které popisují síly působící na těleso. Okrajové podmínky je možno zadávat na hrany či body geometrie nebo případně na uzlové body sítě. Vazeb existuje velké množství, můžeme je rozdělit například podle stupňů volnosti které odebírají. Například vetknutí, které zamezuje všem posuvům i rotacím, nebo kloubová vazba, která umožňuje natáčení.

Pro zadávání okrajových podmínek byl použit SW ANSA, který má velké množství nastavení vazeb. Uchycení a zatížení světlometu bylo diskutováno a specifikováno odborníky firmy VLS. Pro nahrazení zbylé části světlometu byla užitá vazba SPC, která se aplikuje na uzly dané součásti a dle nastavení lze zabránit všem rotacím i posuvům jako v tomto případě.



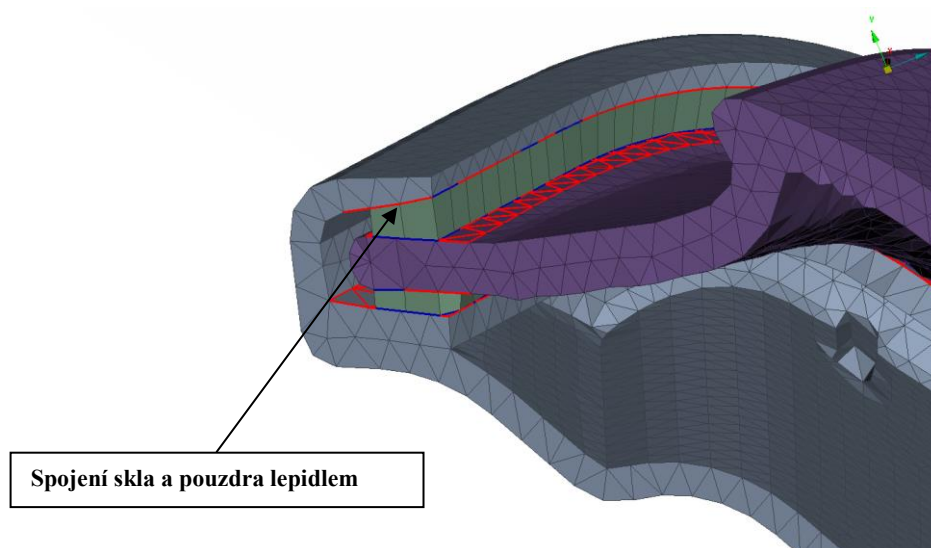
Obr. 25 SPC Vazba

Na uzly zjednodušeného šroubu a matky je aplikována O. P. uchycení, která zabraňuje posuvu v ose X a Y a zamezuje rotacím kolem všech os X, Y a Z viz obr. 2. Takto nastavené O.P. simulují ulomení při dynamickém testu kdy dochází ke stříhu.



Obr. 26 O.P. Šroub

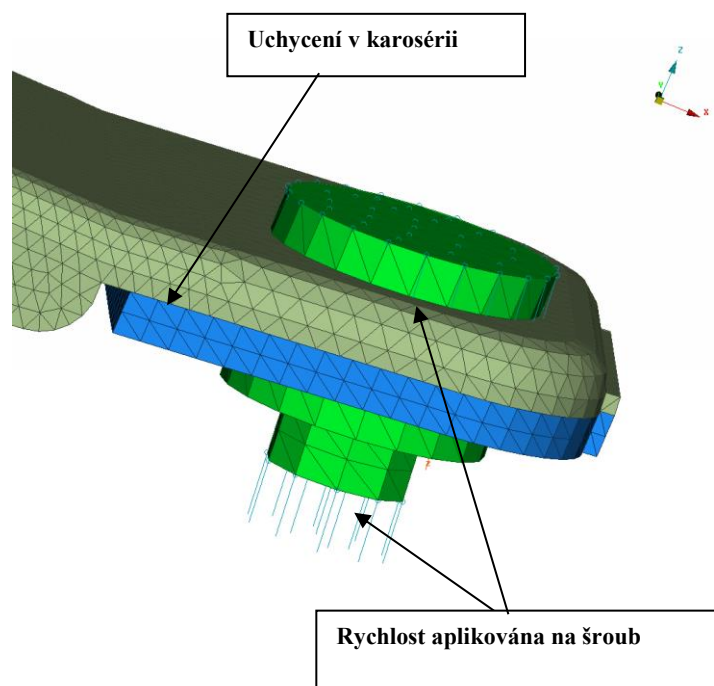
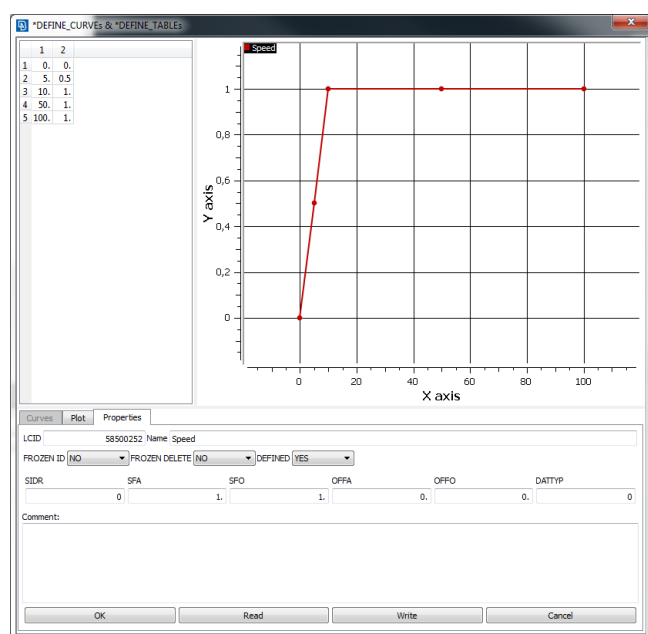
Další vazba byla vytvořena mezi sklem a pouzdem světlometu v této části bylo vytvořeno spojení pomocí lepidla, které se chová stejně jako vazba RBE1.



Obr. 27 Lepidlo mezi sklem a pouzdem

2.3 Kinematické buzení

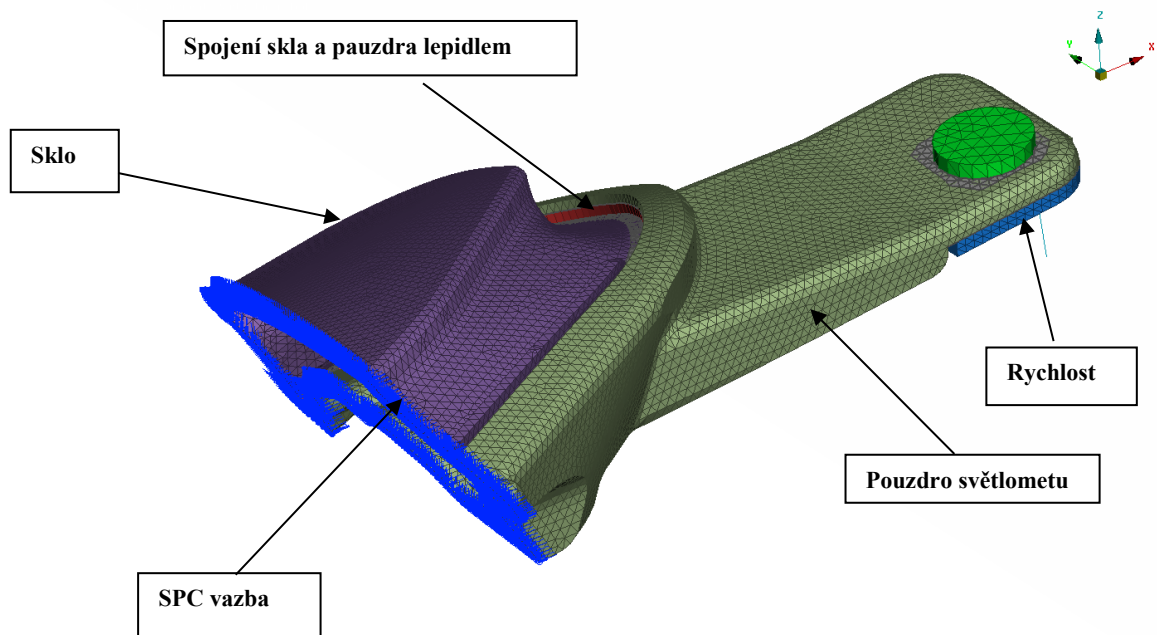
Na šroub bylo aplikováno tzv. kinematické buzení, konkrétně rychlost. Ta byla aplikována na uzly matice a šroubu ve směru osy Z. Zadaná rychlost 1 m/s byla rovnoměrně rozložena mezi uzly. Rychlost byla definována pomocí křivky a to postupně, tak aby nedošlo k okamžitému ulomení.



Obr. 28 Definice kinematického buzení

Čas [ms]	Rychlost [m/s]
0	0
5	0.5
100	1

Tab. 1 Definice rychlosti



Obr. 29 Kompletní přehled okrajových podmínek

2.4 Kontakty

Moderní výpočtové SW jsou schopny využívat celou řadu algoritmů pro řešení kontaktních úloh a liší se zejména v detekci kontaktních oblastí. Definování kontaktu představuje velmi užitečný a potřebný prostředek umožňující zajistit interakci mezi několika tělesy.

Ke vzniku kontaktu dochází při styku dvou těles. V oblasti kontaktu dochází k tvorbě kontaktní plochy, kterou se přenáší síly a vytvářejí normálovou tlakovou složku kontaktního napětí a smykovou složku kontaktního napětí v případě přítomnosti tření. V praxi se velmi často setkáváme s případem, kde část hranice jednoho tělesa zasahuje do druhé části své hranice a tím vstupuje do kontaktu nebo dochází ke kontaktu s jinými tělesy. Tento „problém“ nazýváme kontaktní úloha. Přidáním kontaktních podmínek se vytváří úloha,

která mnohem realističtěji popisuje danou problematiku. Nepříjemným faktem je, že kontaktní problém je specifický nelineární problém a přidáním kontaktu do výpočtového modelu se zvyšují nároky na výpočetní čas i software.

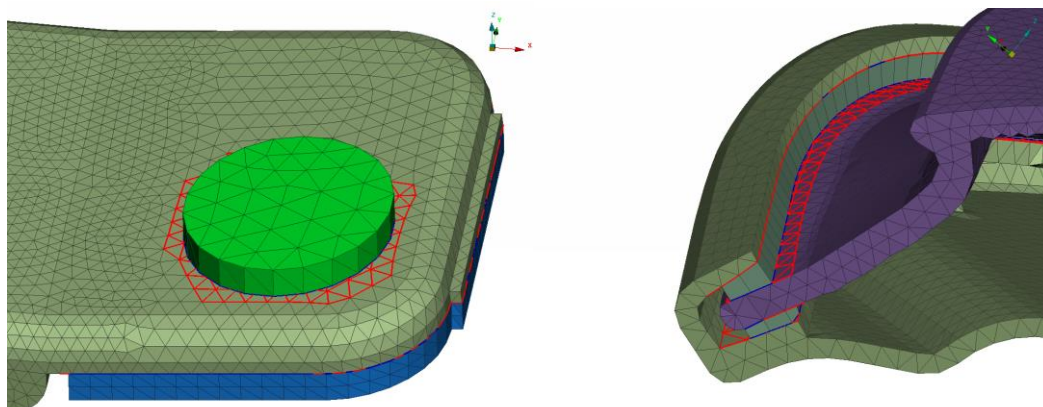
Na kontaktní úlohu (problém) můžeme nahlížet z několika odlišných pohledů, ale z hlediska studia kontaktu se kontakt nejčastěji dělí do dvou kategorií: [6]

- kontakt bez tření
- kontakt se třením

Jestliže vstoupí do kontaktu dvě kontaktní plochy, v případě kontaktu bez tření přenáší se mezi styčnými plochami pouze normálové složky síly. Kontaktní povrchy se mohou vzájemně oddělit, ale nemohou penetrovat. Smyková složka sil je nulová. Praktickým příkladem využití tohoto typu kontaktu je např. kontakt mezi dobře mazanými povrchy. Kontakt se třením naopak zahrnuje i přítomnost smykových složek napětí. Jiný typ dělení kontaktu je dle typu kontaktních těles. [6]

- deformovatelné a deformovatelné těleso
- deformovatelné a tuhé těleso.

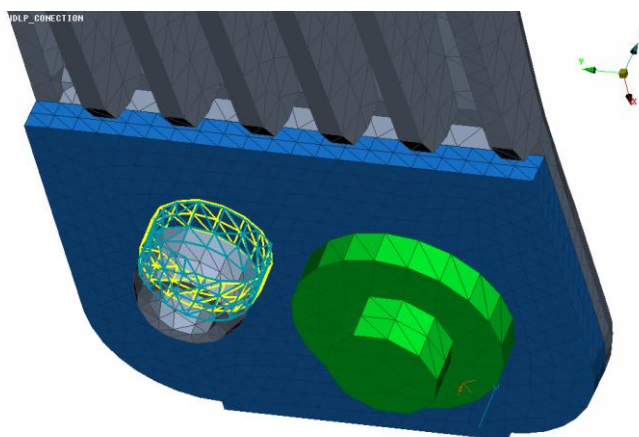
V této práci byly použity dva typy kontaktů. První typ je tzv. Tied kontakt, který je vytvořen mezi pevně spojenými součástmi jako je sklo a pouzdro světlometu a pouzdro světlometu s částí karosérie auta, které je spojeno pomocí šroubu. Tento kontakt je definovaný jako vazba, která svazuje pevně posuv uzlů na podřízené ploše s posuvem uzlů na ploše hlavní. Tato vazba je aplikována na plochu tvořenou elementy. Na obrázku 30 lze vidět Tied kontakty vytvořené mezi součástmi.



Obr. 30 Tied Kontakt mezi částí automobilu a světlometu

U šroubu s maticí bylo použito zjednodušení, kdy šroub a matice byl vymodelován jako jeden kus. Tímto zjednodušením nám vypadne jeden kontakt a tím dosáhneme rychlejšího výpočtu jelikož kontakt je nelineární záležitost a každý kontakt navíc nám prodlužuje výpočet. Toto zjednodušení vneseme jen minimální chybu do výpočtu jelikož materiál šroubu a matky je mnohem tužší než materiál pouzdra.

Druhým typem byl tzv. Automatic kontakt. Jeden tento kontakt byl vytvořen mezi pinem pouzdra světloometu a částí auta a další mezi dříkem šroubu a pouzdrem. Tento kontakt používáme v případě, kdy může dojít k velkým deformacím. Tento druh kontaktu není orientován a může detekovat průnik s obou stran. Automatic kontakty jsou zobrazeny na obr. 31.



Obr. 31 Automatický kontakt

2.5 Materiálové parametry

V této kapitole jsou uvedeny materiálové parametry jednotlivých dílů světloometu.

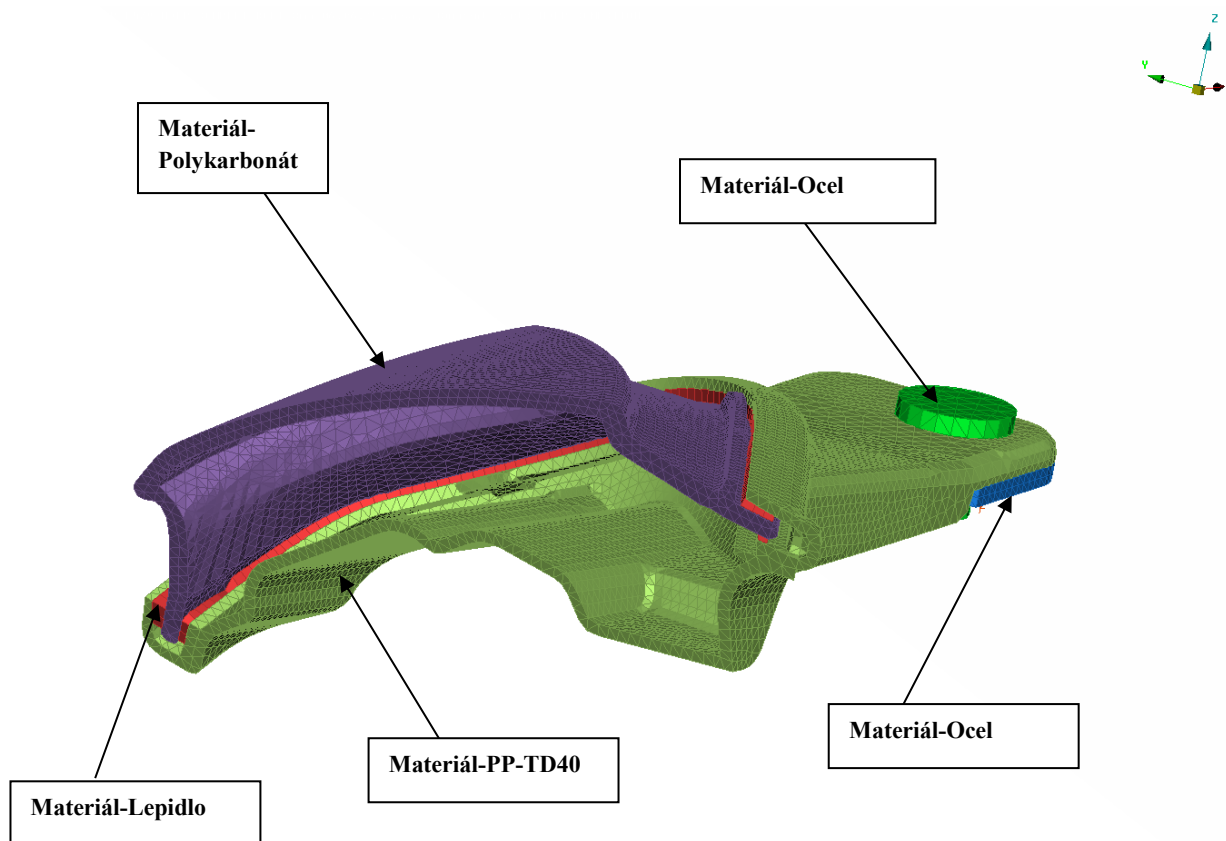
V dnešní době je na trhu několik tisíc různých druhů plastů. V technické praxi je výrazně využíváno jen několik desítek druhů plastů. Vývoj plastů jde neustále dopředu a to dvěma směry. Tím prvním je výroba stále nových polymerů a druhou cestou je modifikace dosavadních polymerů. Toto zvyšování počtu materiálů má své výhody pro konstrukci a výrobu dílů z plastů, aniž by došlo k výrazné změně ceny. Na druhé straně to klade zvýšené nároky na znalosti konstruktérů.[7]

Výhody a nevýhody plastů lze shrnout do následujících bodů. Mezi výhody patří nízká měrná hmotnost, výborné zpracovatelské vlastnosti, plasty jsou elektrické izolanty, mají výbornou korozní odolnost, tlumí rázy a chvění, atd. nevýhodou jsou nízké mechanické a časově závislé vlastnosti, creep, ekologická zátěž, apod. [7]

Následující materiálová data byla převzata z materiálového listu společnosti VLS

Číslo	Díl	Počet elementů	Materiál	Hmotnost [kg]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Měrná hmotnost [kg/m ³]	Poissonova konstanta [-]
1	Pouzdro světlometu	179198	PP-TD40	0.04	4100	1,24E-9	0,35
2	Sklo	24485	PC	0.05	2350	1,2E-9	0,4
3	Část automobilu	3053	Ocel	0.02	21000	7,85E-9	0,3
4	Šroub-podložka	13116	Ocel	0.02	21000	7,85E-9	0,3
5	Lepidlo	978	Lepidlo	0.003	5	1,4E-9	0.4

Tab. 2 Materiálové parametry



Obr. 32 Rozložení materiálů

3. Optimalizace výpočtu

V této části diplomové práce bude popsán postup optimalizace strukturální analýzy ulomení držáku světlometu. Optimalizace výpočtu je prováděna v několika krocích. V každém kroku bude provedeno několik výpočtů pro různé nastavení. Následně na základě vyhodnocení napětí a síly pro ulomení držáku světlometu bude vyhodnocen vliv dynamických efektů na kvalitu výsledků a délku výpočtu. Po vyhodnocení se přejde k dalšímu kroku optimalizace, tak aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků za co nejkratší výpočetní čas. Bude popsán vliv velikosti MKP sítě, úprava rychlosti deformace a modifikace měrné hmotnosti.

Simulace v této práci jsou řešeny pomocí SW LS-DYNA. Tento software je multifunkční explicitní a implicitní program. Využití je rozšířeno do mnoha odvětví pro velké množství odlišných problémů v automobilové, lodní a vesmírné technice, kde se provádí typické crash simulace. Dalšími aplikacemi jsou simulace tvářecích procesů, jak za studena tak za tepla, výbuchy, průstřely apod.. Program je charakteristický možností plně automatickou generací kontaktů, více než 200 materiálovými modely a velkým množstvím použitelných elementů (Shell, Solid, Beam, Truss, Spring, Lumped Mass, Damper, Seatbelt) nebo speciálními modely například pro automobilovou techniku (airbagy, pásy apod.). [8]

Vstupním souborem pro spuštění výpočtu je tzv. k-soubor obsahující logicky řazenou databázi použitých klíčových slov, kterým lze poměrně jednoduše porozumět. Podobné příkazy jsou uskupeny pod jedním klíčovým slovem. Každé klíčové slovo poté obsahuje jednu nebo více karet (povinné nebo volitelné), kde se vyplňují hodnoty parametrů daného příkazu. Všechna klíčová slova jsou přehledně řazena v LS-DYNA manuálech, které lze nalézt na stránkách výrobce. [8]

Nejdříve je stručně popsán princip implicitní a explicitní metody MKP. V dalších kapitolách je rozebrán postup, základní možnosti a funkce, které lze v LS-DYNA pro numerickou simulaci ulomení použít.

Explicitní i implicitní algoritmus vychází z řešení stejné pohybové rovnice, kterou lze napsat ve tvaru:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (1.)$$

Kde: $[M]$ je matice hmotnosti

$[C]$ je matice tlumení

$[K]$ je matice tuhost

$\{U\}$ je vektor posuvů

$\{\dot{U}\}$ je vektor rychlostí

$\{\ddot{U}\}$ je vektor zrychlení

Tato rovnice je soustavou nelineárních parciálních diferenciálních rovnic závislých na čase. Jelikož řešení nelze najít v analytickém tvaru, je nutné tuto soustavu rovnic řešit numericky. Při rychlých dějích je výhodnější tyto rovnice řešit explicitní metodou časové integrace.

3.1 Implicitní algoritmus

Pro řešení se předpokládá znalost řešení v časových okamžicích t_0, t_1, \dots, t_n . Úkolem je určit odezvu soustavy v čase t_{n+1} . Časový krok je $\Delta t = t_{n+1} - t_n$. Pohybová rovnice má v čase t_{n+1} tvar:

$$[M]\{\ddot{U}\}_{n+1} + [C]\{\dot{U}\}_{n+1} + [K]\{U\}_{n+1} = \{F\}_{n+1} \quad (2.)$$

Po provedení úprav se získá rovnice pro určení neznámých posuvů v čase t_{n+1}

$$\left([K] + \frac{[M]}{\Delta t^2}\right)\{U\}_{n+1} = \{F\}_{n+1} + \frac{[M](2\{U\}_n - \{U\}_{n+1})}{\Delta t^2} \quad (3.)$$

Hlavní rysy implicitního algoritmu jsou:

- Využívá diferenční schéma, které vyjadřuje posuvy, rychlosti a zrychlení v čase t_{n+1} pomocí hodnot v čase t_n i v čase t_{n+1} . Odtud se odvozuje název algoritmu, tj. implicitní

- Schéma je nepodmíněně stabilní, to znamená, že stabilita řešení nezávisí na délce kroku Δt . Stabilitou se míní schopnost udržet malé odchylky dvou řešení, jejichž počáteční podmínky se liší pouze o malou hodnotu. Nutno si uvědomit, že při nevhodné volbě délky časového kroku může být výsledek odlišný od chování reálného systému, který je modelován příslušným výpočetním modelem. Z pohledu výpočtu se však model chová stabilně tzn., nezačne divergovat. Pro nestabilní chování je typické naprosté zhroucení výpočtu během několika časových kroků
- Při řešení každého časového kroku je třeba opakovaně řešit soustavu 3, včetně časově náročné triangularizace dynamické matice tuhosti.
- Při použití implicitního algoritmu je snahou aplikovat co nejdelší časové kroky. Velké kroky pak vyžadují použití tenzorů velkých deformací při popisu kinematiky pohybu. Využívá se přírůstkově-iteračním algoritmus Newton-Raphsonovy metody [6]

3.2 Explicitní algoritmus

Opět bude řešena rovnice 1. (základní MKP). V případě explicitního algoritmu se k aproximaci zrychlení využívá metoda centrálních diferencí, která vyjadřuje posuvy, rychlosti a zrychlení v čase t_{n+1} pouze pomocí hodnot v čase t_n .

$$[M]\{\ddot{U}\}_n + [C]\{\dot{U}\}_n + [K]\{U\}_n = \{F\}_n \quad (4.)$$

Po provedení úprav se získá rovnice pro určení neznámých posuvů v čase t_{n+1}

$$\frac{[M]}{\Delta t^2} \{U\}_n = \{F\}_{n+1} - [K]\{U\}_n + [M] \frac{2\{U\}_n - \{U\}_{n-1}}{\Delta t^2} \quad (5.)$$

Základní rysy explicitního algoritmu jsou následující:

- Posuvy v čase t_{n+1} získáváme z pohybové rovnice 5, psané pro předchozí časový okamžik t_n , odtud název algoritmu tj. explicitní

- Nevýhodou explicitní formulace je skutečnost, že explicitní algoritmus je podmíněně stabilní. Stabilního výsledku se dosáhne pouze při dodržení dostatečně malé časové délky časového kroku. Matematicky zapsáno je tuto podmínku možno vyjádřit následující rovnicí:

$$\Delta t < \Delta t_c \quad (6.)$$

kde Δt_c je kritická délka časového kroku. Závisí na velikosti elementů v dané síti a rychlosti šíření zvuku (napětových vln) ve vyšetřovaném prostředí. Velikost kritické délky časového kroku je možno určit z rovnice (Courantovo kritérium), která má následující tvar:

$$\Delta t_c = \frac{h}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (7.)$$

kde h je charakteristický rozměr nejmenšího prvku sítě, E je modul pružnosti v tahu a ρ je hustota materiálu. Fyzikálně lze kritickou hodnotu časového kroku definovat jako dobu průchodu napětové vlny nejmenším prvkem sítě.

- Proto je nutno při tvorbě sítě vhodně volit její rozměry. Časový krok při aplikaci explicitní metody je asi 100 až 1000 krát menší než časový krok používaný u implicitního algoritmu. Při použití explicitního algoritmu je analyzovaný časový interval rozdělen na mnohem více krátkých časových kroků, jejichž řešení je ale mnohem rychlejší, než v implicitním případě. Vzhledem k malé délce kroku odpadají iterace uvnitř kroku a rovněž popis kinematiky pohybu při velkých deformacích je jednodušší. Explicitní řešení tedy vyžaduje extrémně velký počet kroků při extrémně nízké výpočtové náročnosti kroku. [6]

4. Velikost sítě MKP

Tato kapitola popisuje úpravu velikosti sítě v oblasti drážky, kde dochází k ulomení (tzv. Rupture line) světloometu. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.1. kvalita a velikost MKP sítě výrazně ovlivňuje přesnost výsledků respektive délku výpočetního času. Na obr. 33 –37 lze vidět změnu charakteru sítě se změnou jednotkové velikosti. V tab. 3 jsou zaznamenány počty elementů pro jednotlivé výpočetní varianty pacek.

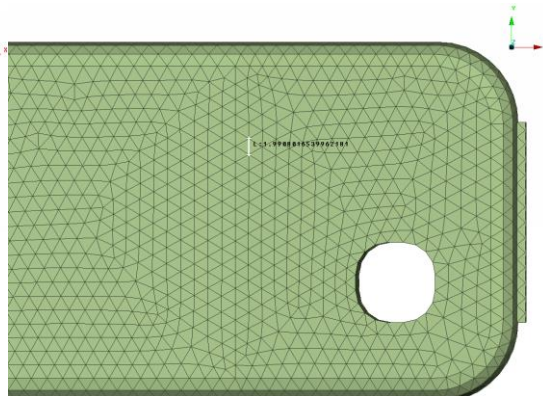
Velikost sítě	Počet elementů povrchové sítě	Počet elementů objemové sítě
1 mm	27 288	49 278
2mm	24 950	38 596
3mm	23 320	36 040
4mm	22 348	34 637
5mm	21 750	33 186

Tab. 3 Parametry výpočetních modelů konečno prvkové sítě

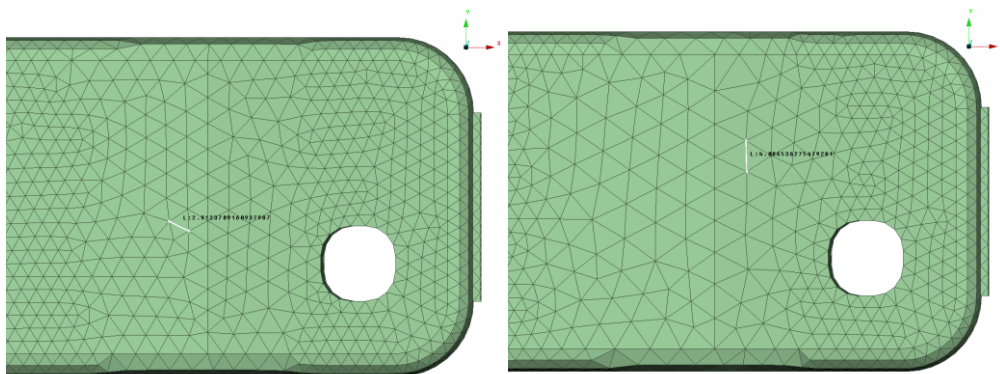
Na obr. 33 – 37 je zobrazeno, jak se v oblasti drážky mění velikost elementů pro zadanou jednotkovou velikost sítě od 1 do 5 mm. Z obr. 39 lze vidět, že od velikosti 3 mm není možno v oblasti drážky vložit dva elementy na šířku. V další části bude popsáno, jak toto zjednodušení bude ovlivňovat výsledky.



Obr. 33 Velikost elementu 1mm

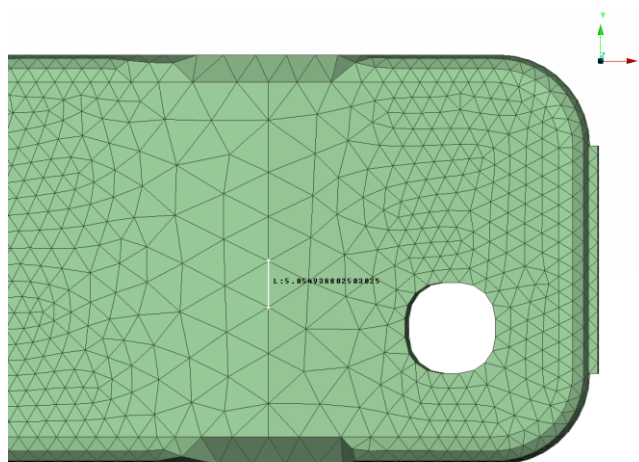


Obr. 34 Velikost elementu 2 mm

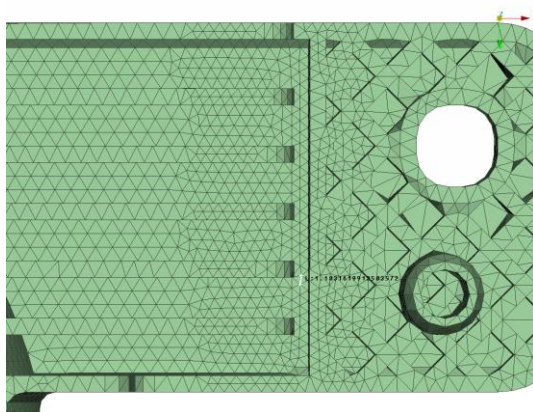


Obr. 35 Velikost elementu 3mm

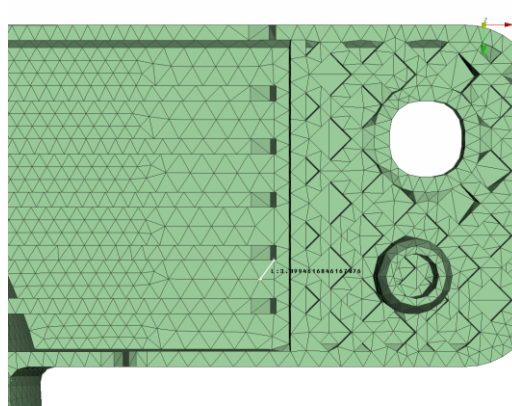
Obr. 36 Velikost elementu 4mm



Obr. 37 Velikost elementu 5mm



Obr. 38 Detail drážky pro ulomení 1mm



Obr. 39 Detail drážky pro ulomení 3mm

4.1 Vyhodnocení úpravy sítě

V tomto bodě bude prezentován vliv velikosti sítě na ulomení packy světloometu. Součást je při námi nastavených O.P. namáhána na stříh. Vyhodnocení bylo prováděno v SW-Meta. Vyhodnoceno bude napětí [Mpa], při kterém dojde k ulomení v místě drážky a síla [N] potřebná pro ulomení. Napětí je vyhodnocováno podle Von Misesovi podmínky plasticity. Tato podmínka vychází z HMM hypotézy, která srovnává různé napjatosti podle deformační energie na změnu tvaru:

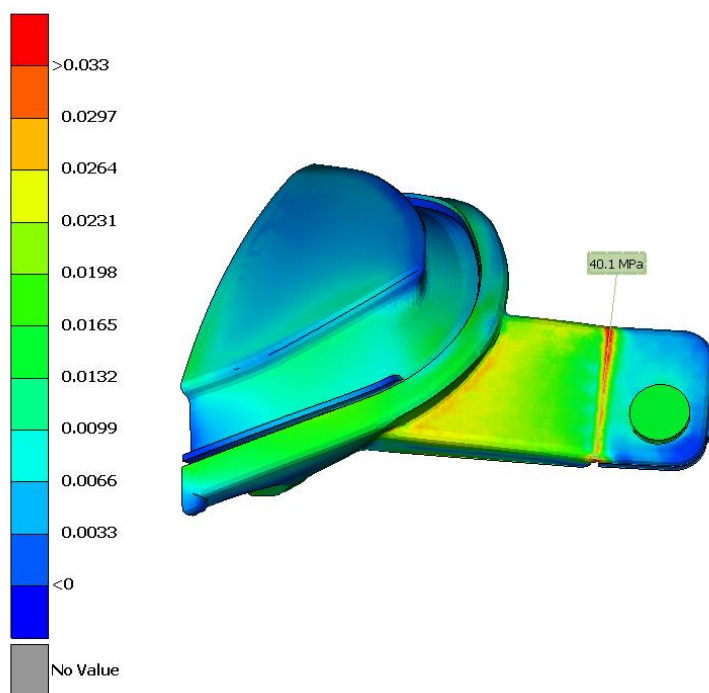
V hlavních napětích:

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} = \sigma_k \quad (8.)$$

Nebo:

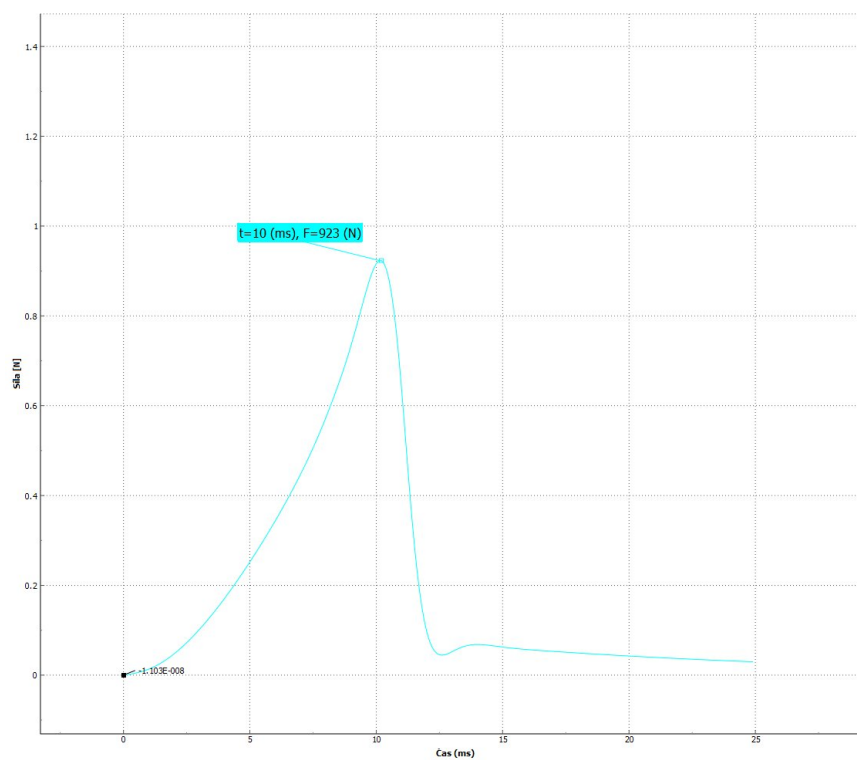
$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \sigma_z) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} = \sigma_k \quad (9.)$$

U první výpočetní varianty byla hodnota velikosti sítě v oblasti drážky nejmenější a to 1mm. Tento model je popsán nejpřesněji díky malé velikosti elementu a měl by poskytovat nejpřesnější výsledky. Zároveň zde ale výpočet trval nejdéle. Hodnota napětí při které dojde k ulomení je 40 MPa. Síla potřebná k ulomení packy je po použití filtru CFC 180 pro vyhlazení křivky 923 N.



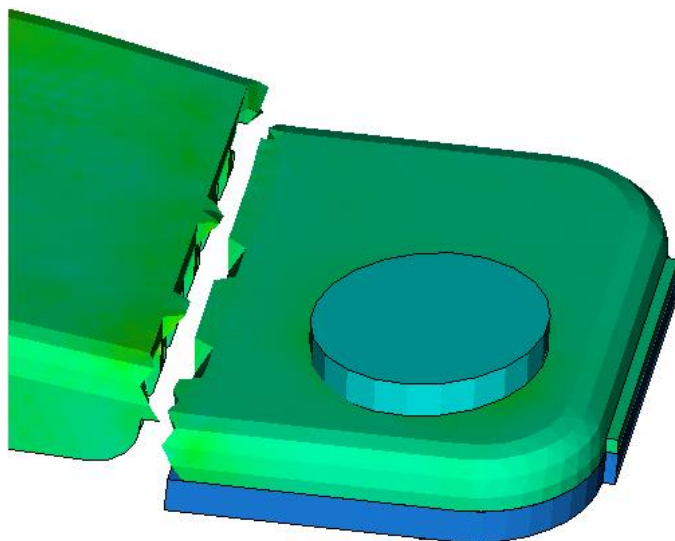
Obr. 40 Napětí v místě drážky pro délku elementu 1mm

Na obr. 41 lze vidět průběh síly v čase síla, která konstantně narůstala, než dojde k narušení materiálu a následnému prasknutí.

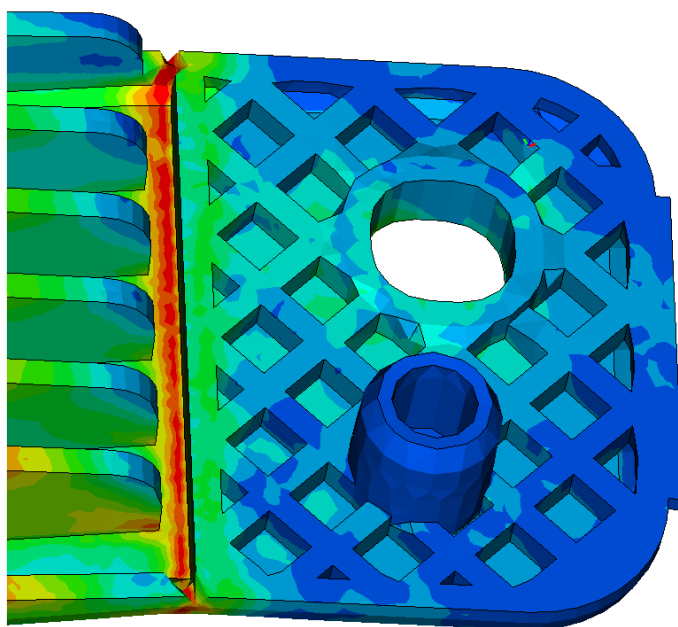


Obr. 41 Průběh síly v čase pro délku elementu 1mm

U toho nastavení lze také kvalitně popsat průběh ulomení Obr. 42 v místě drážky díky jemné síti.

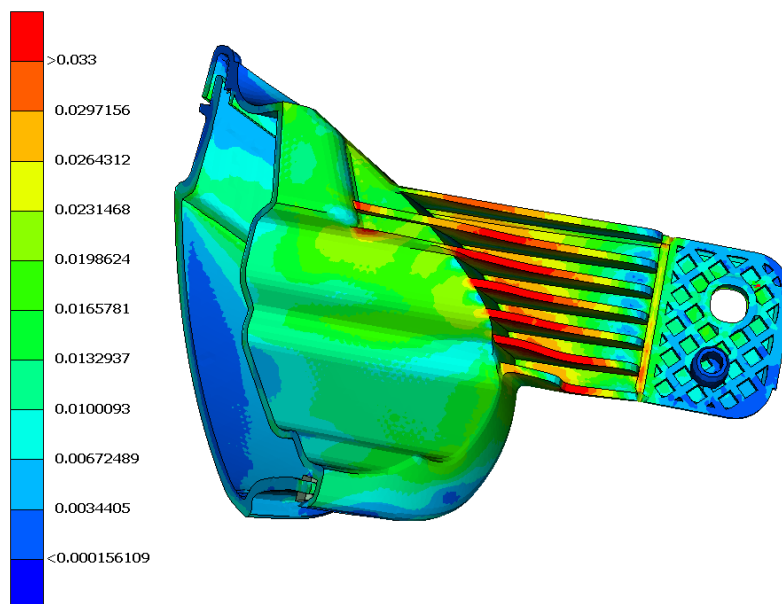


Obr. 42 Průběh ulomení 1mm

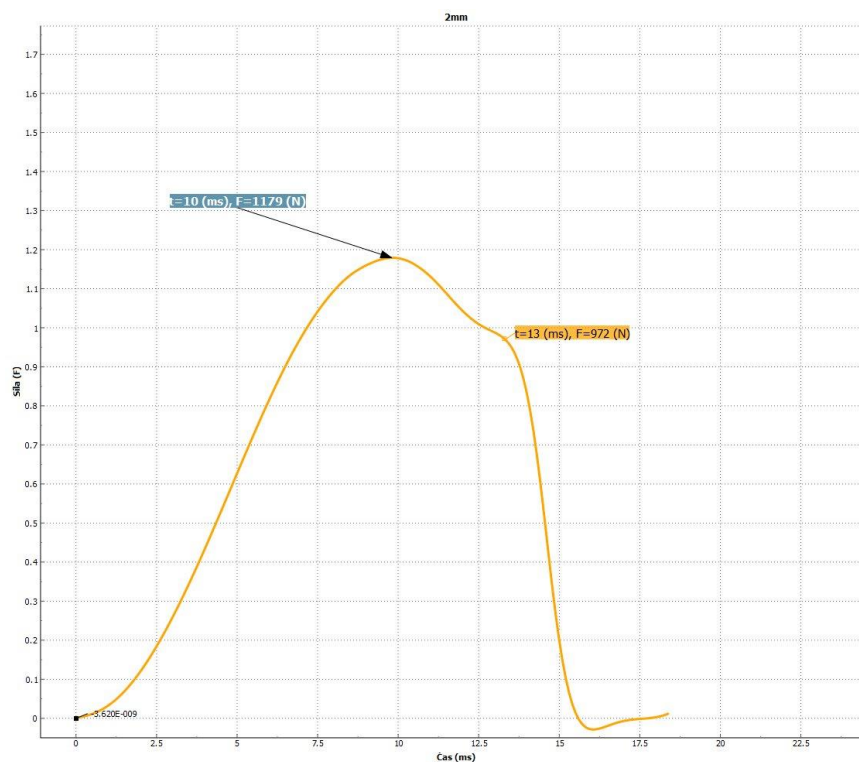


Obr. 43 Průběh napětí při ulomení 1mm

Druhá výpočetní varianta velikost sítě 2mm. I zde došlo k ulomení v místě drážky, ale z důvodu, že drážka už není tak jemná, dochází také k negativnímu ohybu v místě, kde je packa napojena na pouzdro světlometu obr. 44. Na obr. 45 lze vidět nárůst síly, která z důvodu ohybu součásti byla navýšena na hodnotu 1179 N, ale při této hodnotě k prasknutí nedošlo. K ulomení došlo při hodnotě 972 N.

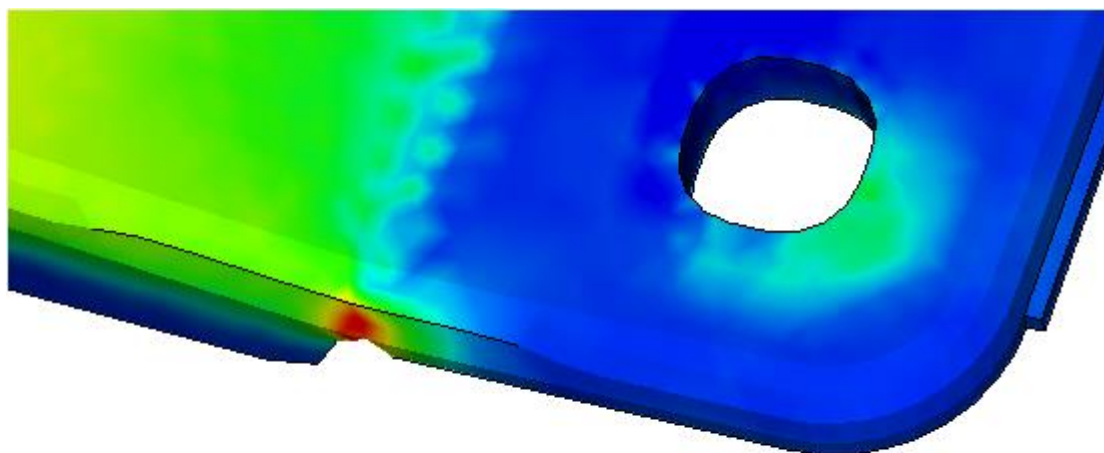


Obr. 44 Negativní ohyb 2mm

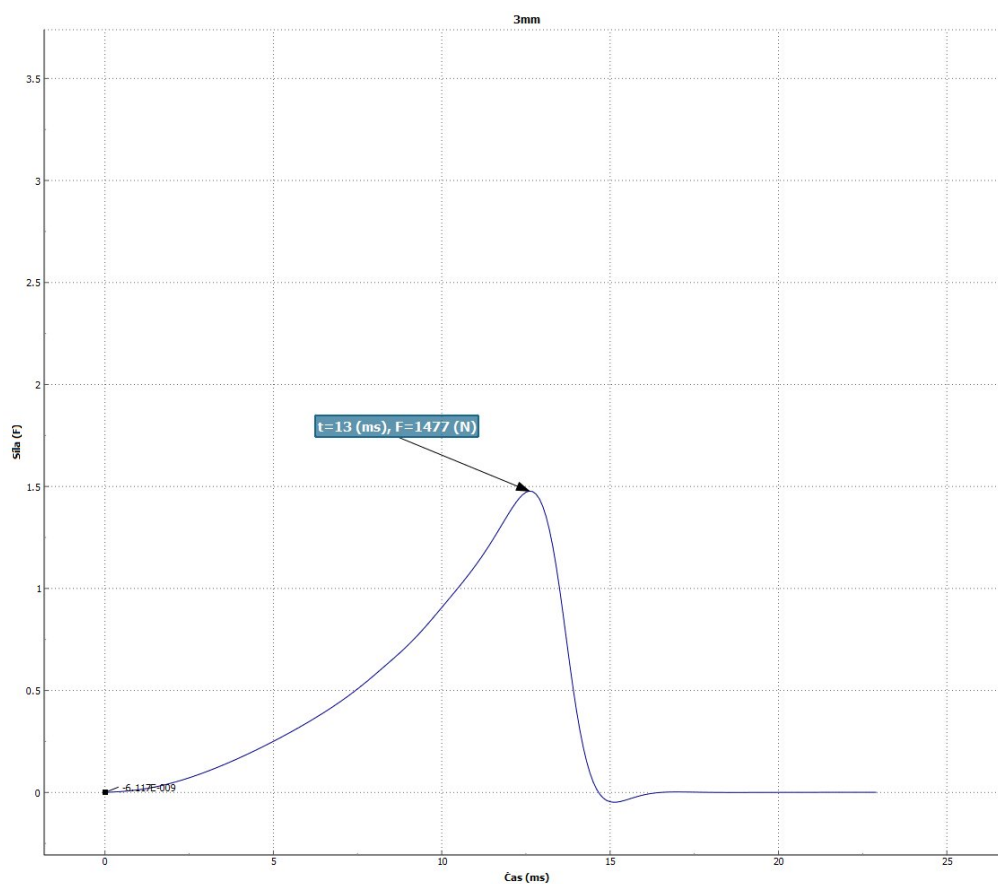


Obr. 45 Průběh síly pro velikost elementu 2mm

Třetí výpočet byl proveden pro 3mm síť. Zde se projevil problém v oblasti hrany, která byla popsána velmi hrubě. Vznikla zde velká hrana a pro ulomení byla potřeba mnohem větší síla. Dalším negativním vlivem byla koncentrace napětí v tomto místě viz. Obr. 46.

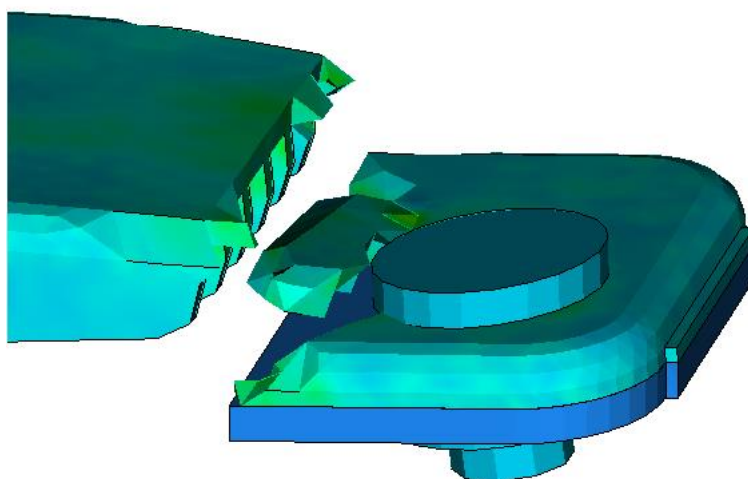


Obr. 46 Koncentrace napětí na hraně pro velikost elementu 3mm

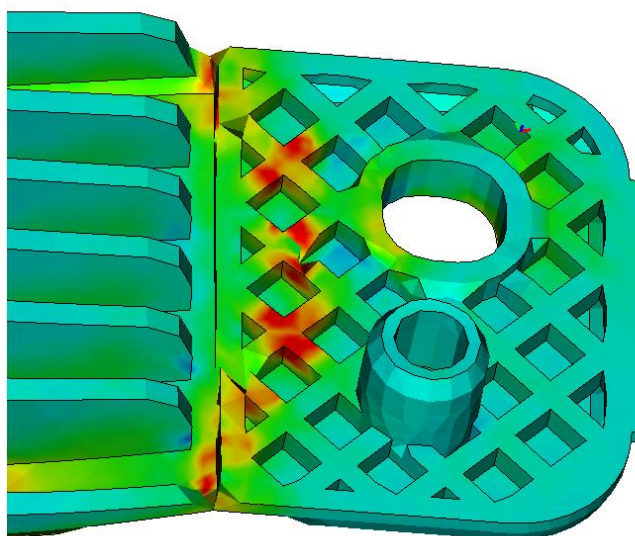


Obr. 47 Průběh síly pro velikost elementu 3mm

Výpočetní varianta pro 4 a 5 mm. Zde došlo ke špatnému šíření napětí trhliny. Na obr. 48 – 49 lze vidět, že dojde k šíření napětí do oblasti mřížky u šroubu. Energie se kvůli velkým elementům přenesla do oblasti šroubu. Při této velikosti elementu již nelze zachytit průběh ulomení packy. V tomto místě následně dojde k vylomení kusu packy, které neodpovídá reálnému ulomení.



Obr. 48 Vylomení části držáku velikost elementu 5mm



Obr. 49 Přenesené napětí pod maticí pro elementu 5mm

V tab. 4 jsou zaznamenány hodnoty napětí a síly při které dojde k ulomení

Varianta sítě	Napětí [MPa]	Síla [N]	Čas ulomení [ms]
1 mm	40.1	923	11
2mm	37.8	1179	10
3 mm	39.5	1477	13
4mm	39.4	1345	12
5mm	39	750	9

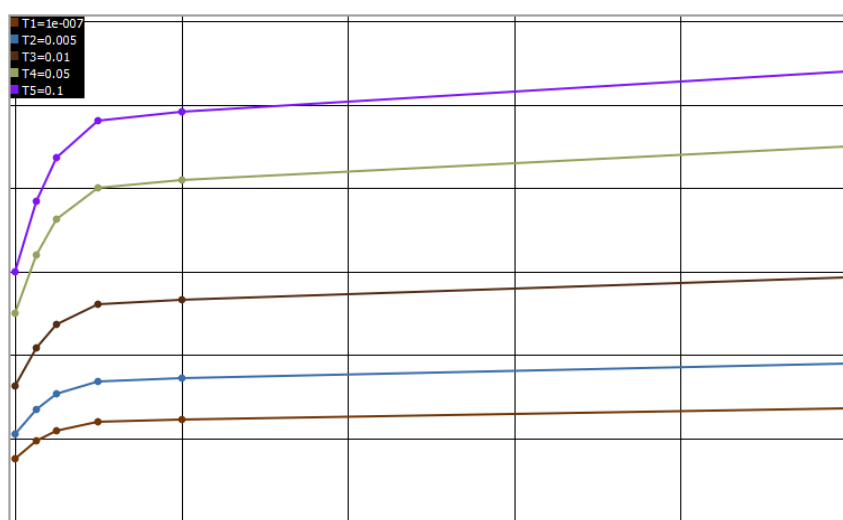
Tab. 4 Hodnoty napětí, síla a čas ulomení

Pro úpravu rychlosti deformace se bude vycházet z výpočetního modelu 1 s velikostí sítě v drážce 1mm. Tento model poskytuje nejpřesnější průběh ulomení packy. Nedochází zde k negativnímu nárůstu síly vlivem ohybu součástí.

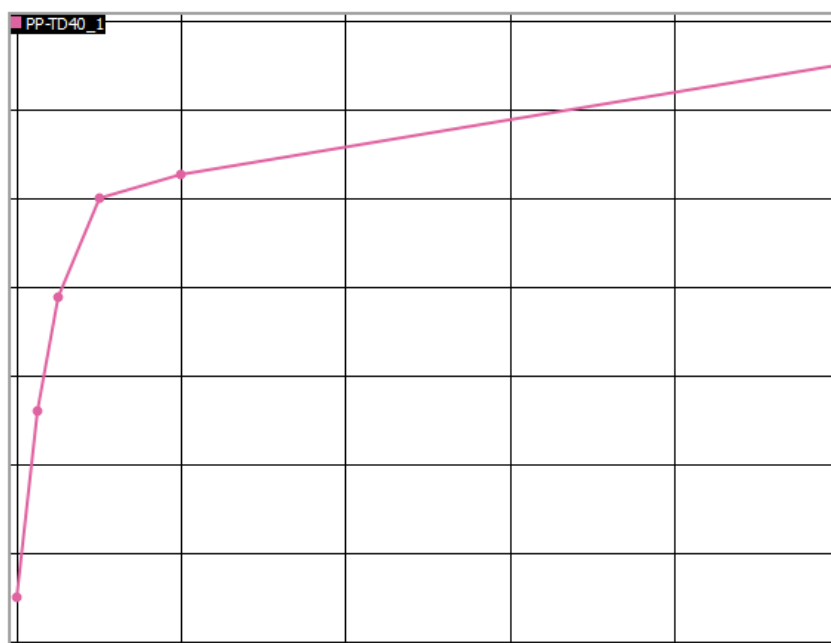
5. Optimalizace rychlosti deformace

Tato optimalizace vychází z předchozího kroku úpravy velikosti sítě. V této části bude popsán další bod pro zrychlení výpočtu a potlačení dynamických jevů. Rychlost deformace bude optimalizována pomocí dvou kroků.

Prvním krokem byla úprava vlastností materiálu PP- TD 40. Chování materiálu může být definováno pomocí jedné či více křivek jako tomu bylo v předchozím kroku. Při první optimalizaci velikosti sítě charakterizovaly materiál vysokorychlostní křivky Obr. 50. Pro tento krok optimalizace bude materiál definován pouze jednou statickou křivkou Obr. 51.



Obr. 50 Vysokorychlostní křivky definující chování materiálu

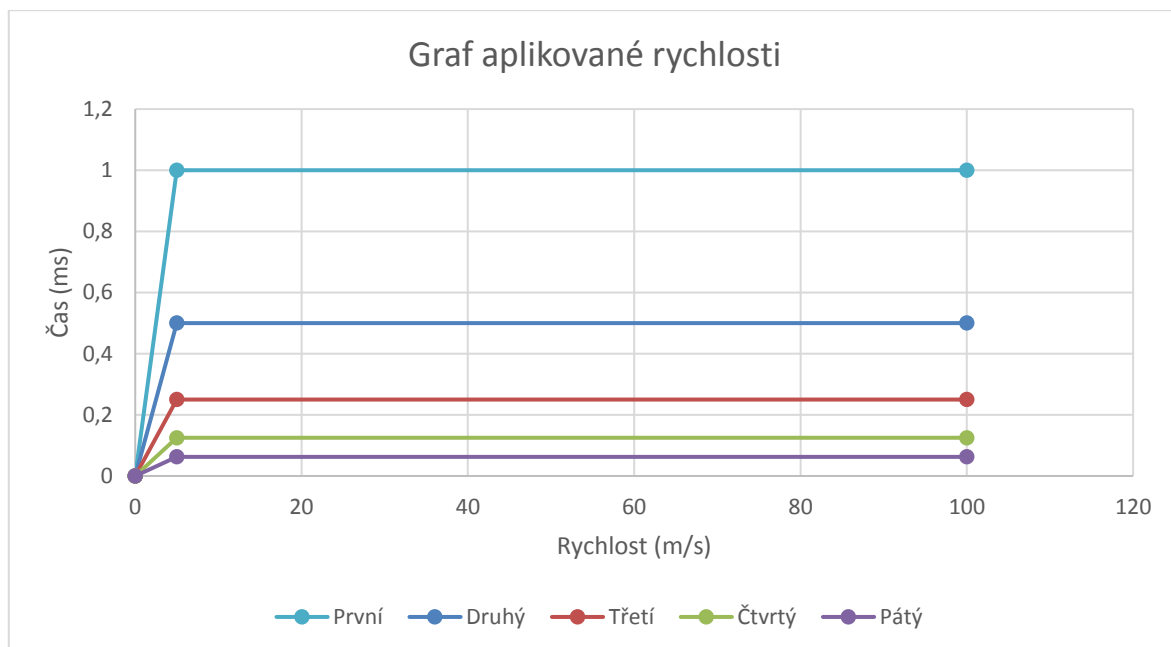


Obr. 51 Křivka blízká statickému chování materiálu

V druhém kroku bude snižována rychlost zadávána na šroub. Snižováním rychlosti se blížíme statickému testu, ale také prodlužujeme výpočetní čas. První výpočet byl proveden opět pro rychlost 1 m/s, ale se statickou křivkou definující materiál. Dále bude rychlost snížena na polovinu, čtvrtinu, tři čtvrtinu a na závěr osminu svojí původní velikosti. Úkolem je vyhodnotit jaký vliv má snížení rychlosti na dynamické efekty a jak se mění velikost napětí a potřebná síla pro ulomení při snižování rychlosti. Pro přehlednost jsou vstupní hodnoty v tab. 4 a znázorněny v grafu 1.

Výpočet									
1		2		3		4		5	
Čas [ms]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Rychlost [m/s]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	5	0.5	5	0.25	5	0.125	5	0.0625
100	1	100	0.5	100	0.25	100	0.125	100	0.0625

Tab. 4 Rychlost pro jednotlivé výpočty

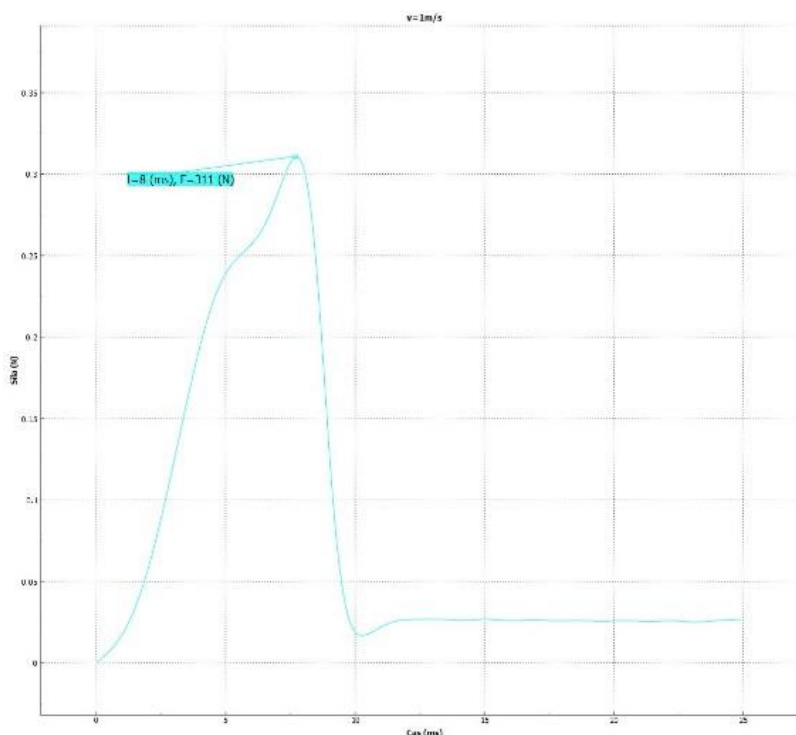


Graf 1. Snižování rychlosti

5.1 Vyhodnocení snižování rychlosti

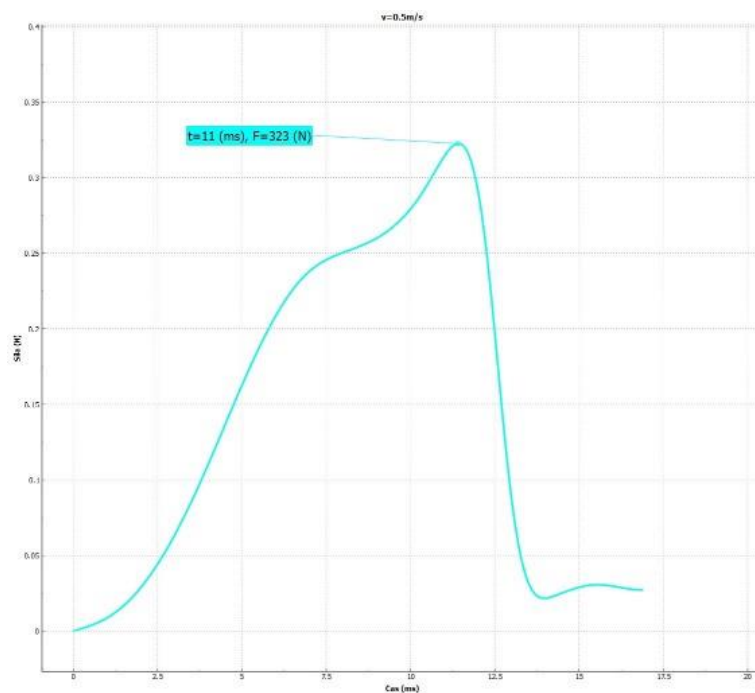
Nyní vyhodnotíme vliv snižování rychlosti na výpočet. Chování materiálu bylo definováno pouze jednou křivkou. Napětí při kterém došlo k ulomení držáku bylo u všech modelů stejné a to 11.4 MPa. Co se měnilo byla síla potřebná pro ulomení a docházelo k prodloužení výpočetního času (času kdy dojde k ulomení).

U prvního výpočtu můžeme zaznamenat největší změny oproti předchozímu výpočtu. Síla se změnou křivky definující materiál snížila s 923N na 311N došlo také ke zkrácení doby kdy dojde k ulomení s 11ms na 8ms. U tohoto modelu můžeme sledovat jaký vliv má změna materiálu na hodnotu napětí, síly potřebné pro ulomení a délku času pro ulomení.



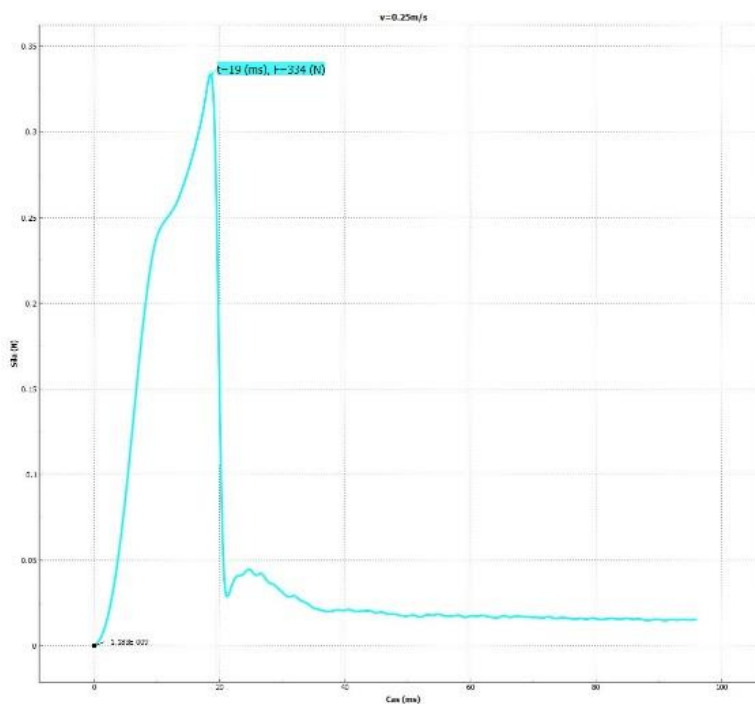
Obr. 52 Průběh síly pro rychlost $v = 1\text{m/s}$

U druhého modelu pro rychlost 0.5 m/s můžeme sledovat malý nárůst času, kdy dojde k ulomení oproti předchozímu modelu 2ms, ale velký rozdíl v síle potřebné pro ulomení 12N.

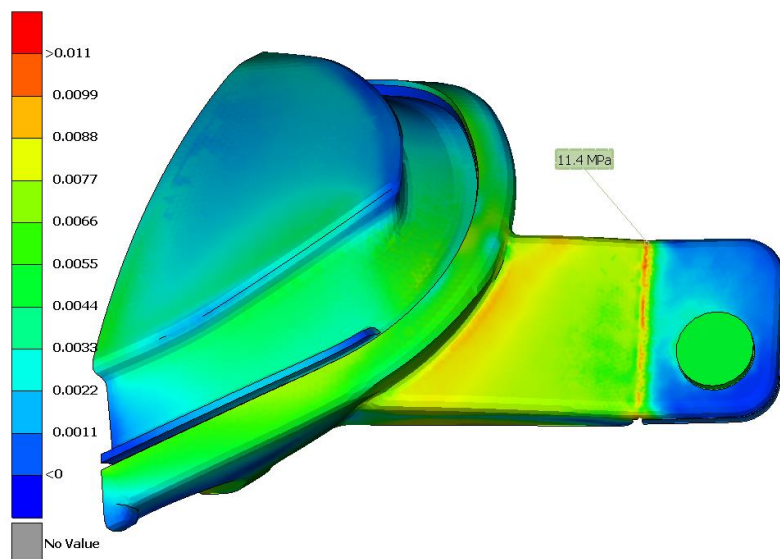


Obr. 53 Průběh síly pro rychlost $v = 0.5 \text{ m/s}$

U třetího výpočtu pro rychlost 0.25 m/s znovu narostl výpočetní čas, kdy dojde k ulomení oproti předchozímu modelu a to o 7 ms. Síla opět narostla o to a to 11N.

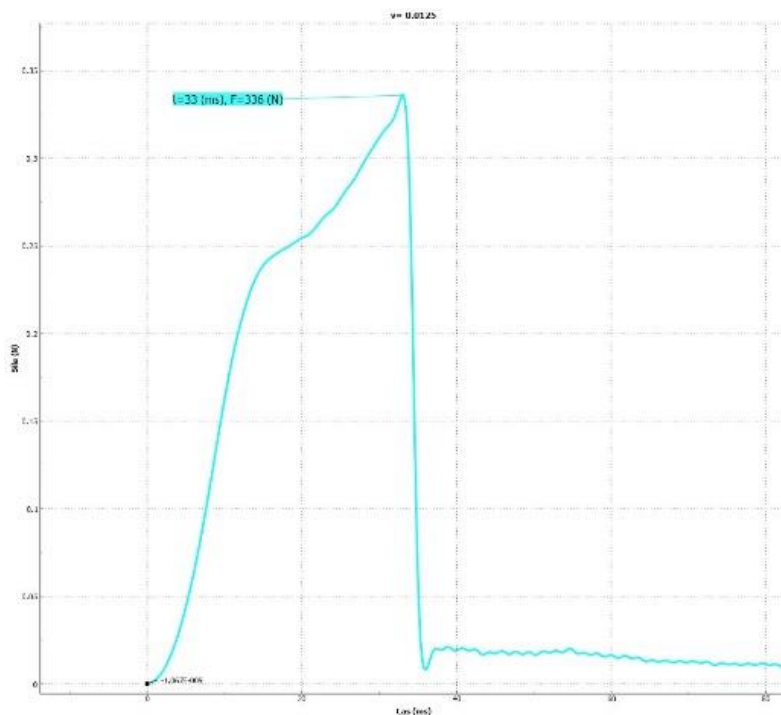


Obr. 54 Průběh síly pro rychlost $v = 0.25 \text{ m/s}$



Obr. 55 Průběh napětí pro rychlost $v = 0.25$ m/s

Až mezi třetím a čtvrtým výpočtem pro rychlost 0.125 m/s docházelo k menším rozdílům síly. Rozdíl sil byl pouze 2N. Avšak výrazně narostl čas pro ulomení a to na 33ms což je o 14ms více než u přechozího výpočtu.



Obr. 56 Průběh síly pro rychlost $v=0.0125$ m/s

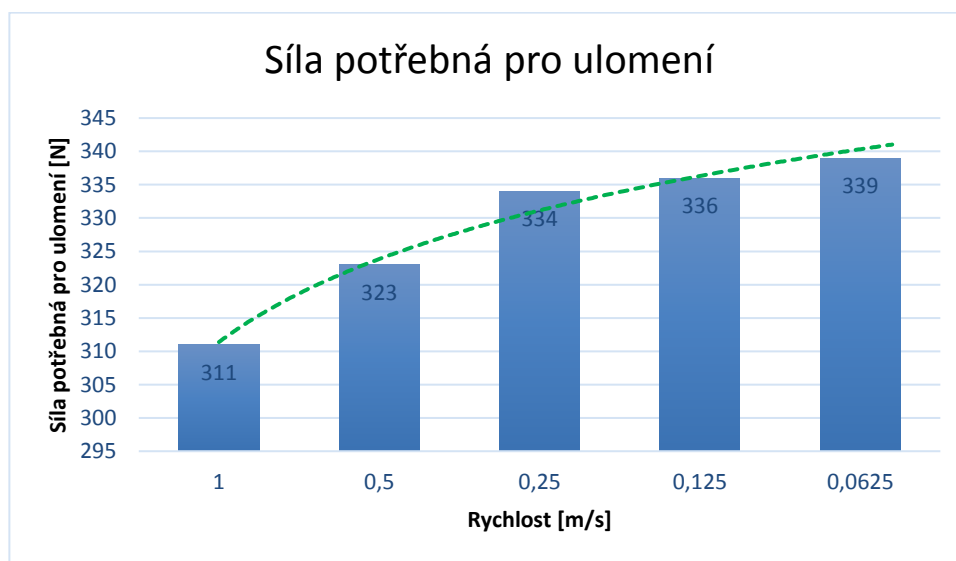
U pátého výpočtu pro rychlost 0.0625 m/s došlo ke skokovému nárůstu doby pro ulomení na hodnotu 60 ms což je z hlediska výpočetního času velmi nepříjemné. Jelikož mezi teoreticky nejpřesnějším pátým výpočtem pro nejnižší rychlost 0.0625 m/s a třetím výpočtem pro rychlost 0.25 m/s je změna v síly pouze dvě procenta budeme nadále vycházet z třetího výpočtu. Od třetího kroku se již rozdíl času potřebný pro ulomení neúměrně zvyšoval v závislosti na síle potřebné pro ulomení. Rozdíl mezi těmito výpočty je 42 ms.

Pro přehlednost jsou výsledky zaznamenány v tab. 5 a grafu 2 a 3

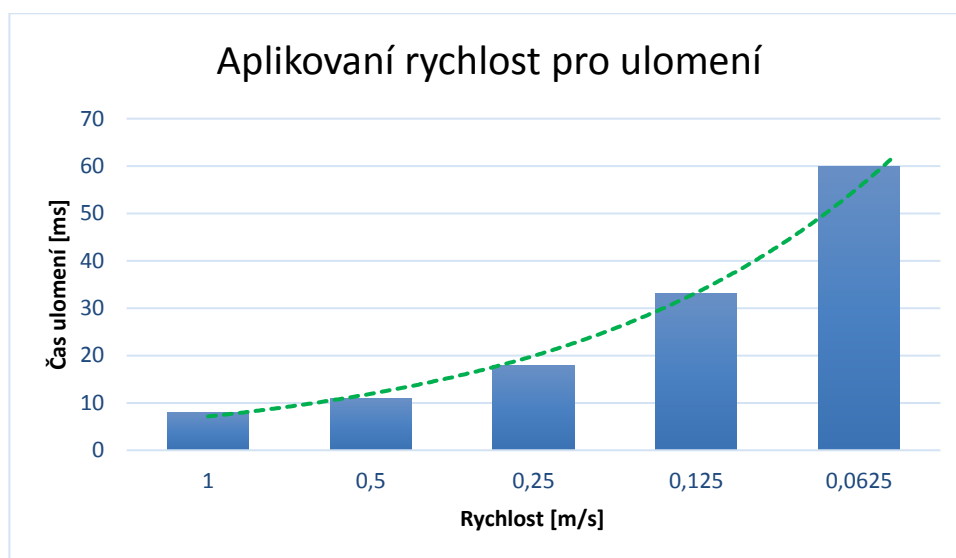
Výpočet	Rychlost [m/s]	Napětí [MPa]	Síla [N]	Čas ulomení [ms]
1	1	11.4	311	8
2	0.5	11.4	323	11
3	0.25	11.4	334	19
4	0.125	11.4	336	33
5	0.0625	11.4	338	60

Tab. 5 Vyhodnocení snižování rychlosti

V grafu 2 a 3 můžeme vidět závislost síly potřebné pro ulomení respektive závislosti na výpočetním čase.



Graf 2. Závislost aplikované rychlosti na síle potřebné pro ulomení



Graf 3. Závislost aplikované rychlosti na výpočetním čase

6. Modifikace měrné hmotnosti - úprava výpočetního kroku

Tato úprava výpočtu je spojena s kritickou hodnotou časového kroku. Jak již bylo uvedeno explicitní časová integrace je podmíněně stabilní. To znamená, že stabilních výsledků můžeme dosáhnout pouze tehdy, pokud časový krok nepřekročí svoji kritickou hodnotu. Ta je definována jako čas, za který čelo napěťové vlny projde přes element. Kritická hodnota časového kroku je spočtena podle vztahu:

$$\Delta t_c = \frac{h}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (10.)$$

Kritická hodnota minimálního časového kroku je závislá na druhé odmocnině hustoty a druhé odmocnině tuhosti materiálu.

Urychlení výpočtu lze dosáhnout při stejné velikosti i počtu elementu za pomoci vložení do výpočtu „nefyzické“ hmoty. Díky této metodě dojde ke snížení časového kroku výpočtu. Ovšem přidáním takovéto hmoty do výpočtu u dynamických dějů může ovlivnit výsledné hodnoty. Toto ovlivnění výsledných hodnot si můžeme dovolit jen v případech malých rychlostí, když kinetická energie soustavy je nižší než vnitřní energie soustavy. V programu LS-DYNA se pro tuto úpravu využívá tzv. DT2MS (Discrete time to mass scale).

U elementů dojde ke zvyšování hmotnosti. Tato metoda je aplikována pouze na ty elementy s výrazně menším charakteristickým rozměrem. Zvýšením hmotnosti vzroste hustota a také délka časového kroku. Dojde ale k ovlivnění chování modelu, zejména pak s ohledem na setrvačné účinky při simulacích dynamických jevů. Maximální navážení modelu v průběhu výpočtu by tedy nemělo překročit únosnou mez (cca 5 – 10%), která se udává v procentech hmotnosti modelu před výpočtem.

Výpočet	1	2	3
Hodnota DT2MS	-8*E-5	-1*E-4	-1*E-3

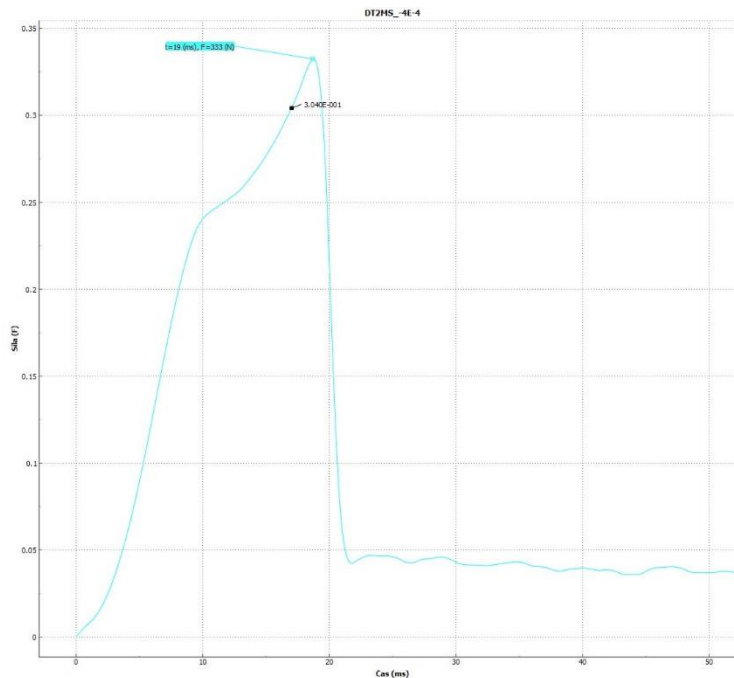
Tab. 6 Hodnoty DT2MS

6.1 Vyhodnocení výpočetního kroku

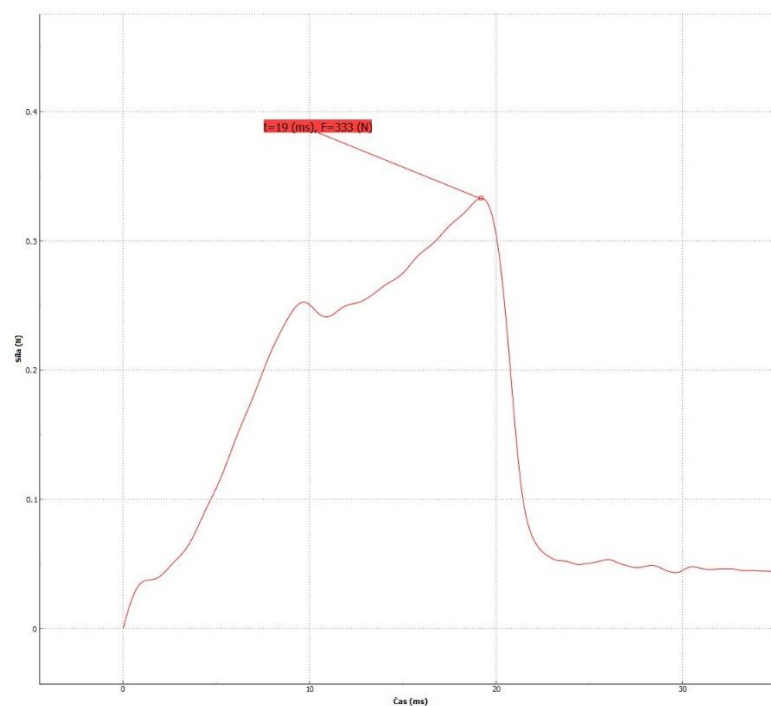
Maximální procento přidané nefyzické hmoty je dle VLS 5%. Pro tuto součást vážící 143g to znamená 7g. Automaticky nastavená hodnota DT2MS byla $-8 \cdot 10^{-5}$ tato hodnota logicky nepřidávala do výpočtu žádnou hmotu. V dalším postupu byla hodnota zvýšena na hodnotu $-1 \cdot 10^{-4}$ přidaná hmotu byla $0.29030 \cdot 10^{-6}$ tudíž jsme stále byli v limitu. Následně byla hodnota snížena o řád a hmotu výrazně narostla na 2.8 kg. Z toho vyplývalo, že ideální hodnota bude ležet někde mezi hodnotami $-1 \cdot 10^{-4}$ a $-1 \cdot 10^{-3}$.

Výpočet	Hodnota DT2MS	Přidaná hmotnost [kg]	Napětí [MPa]	Síla [N]	Čas ulomení [ms]
1	$-8 \cdot 10^{-5}$	0	11.4	334	8
2	$-1 \cdot 10^{-4}$	$0.29030 \cdot 10^{-6}$	11.4	333	19
3	$-1 \cdot 10^{-3}$	2.8	11.4	333	19

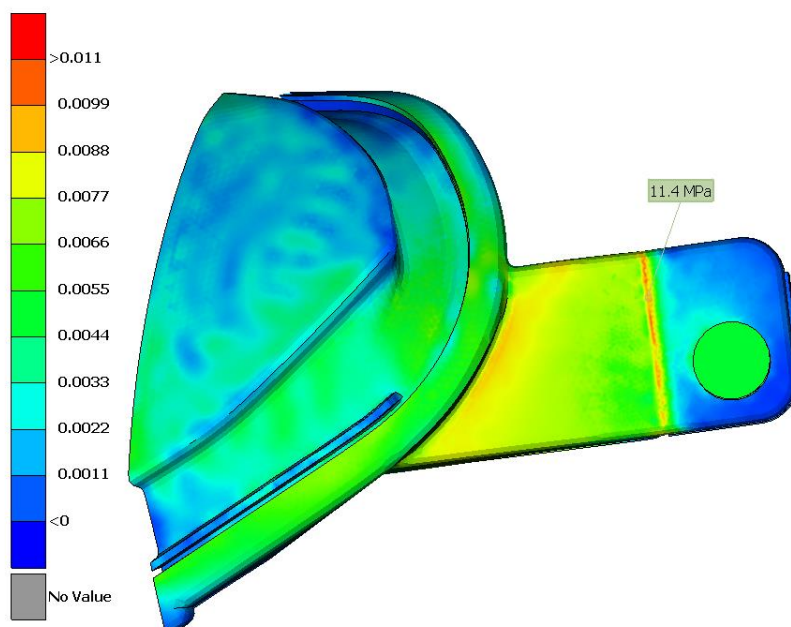
Tab. 7



Obr. 58 Průběh síly pro hodnotu DT2MS $-1 \cdot 10^{-4}$



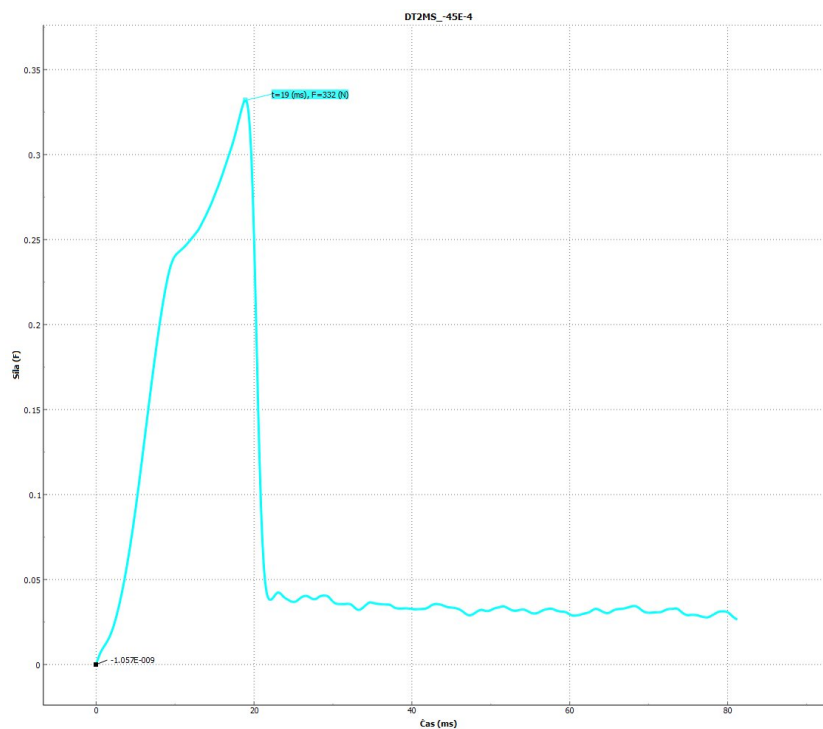
Obr. 59 Průběh síly pro hodnotu DT2MS -1*E-3



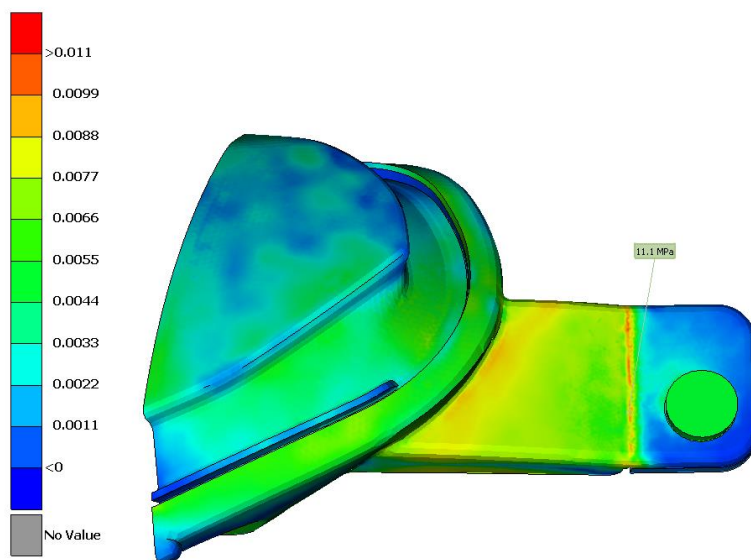
Obr. 60 Napětí na modelu pro hodnotu DT2MS -1 E -3

Posledním krokem bylo zjistit optimální hodnotu DT2MS tak abychom nepřesáhli maximální přidanou hmotu 8g. To byla nakonec hodnota -45 E-4. Do modelu byla přidána hmota vážící 7.6g. Díky této úpravě došlo ke zrychlení výpočtu, aniž by došlo k výraznému ovlivnění výsledků. Síla potřebná pro ulomení klesla pouze o 1N. Tuto změnu

mohla zapříčinit změna výpočtu kroku tím že, daný krok pro sílu 333N byl vynechán. Stejným způsobem došlo i k změně napětí.



Obr. 61 Průběh síly u modelu pro hodnotu DT2MS -45 E -4



Obr. 62 Napětí na modelu pro hodnotu DT2MS -45 E -4

7. Závěr

Téma této diplomové práce na základě požadavků společnosti VARROC LIGHTING SYSTEMS se věnuje optimalizaci strukturálního výpočtu ulomení držáku světlometu při statickém testu pomocí SW LS-DYNA. Práce obsahuje dvě části – teoretickou a výpočetní. První část se zabývá historií a konstrukcí automobilového osvětlení druhá část je zaměřena na optimalizaci výpočtu.

Zadanou součástí byla část světlometu osobního automobilu. Zadání, model a všechny programy potřebné k vytvoření této diplomové práce byly poskytnuty mezinárodní společnosti VARROC LIGHTING SYSTEMS. Programy, které byly použity pro vytvoření této diplomové práce jsou následující: SW ANSA, SW META, SW LS-DYNA.

První kapitola je zaměřena na teoretickou část kde je stručně popsána historie a vývoj světlometů. Následně jsou popsány moderní světlomety, jejich princip a funkce. Dále výhody např. u led světlometů kvalitní osvětlení a vysoká životnost, velkou nevýhodou těchto světlometů je větší pořizovací cena, než je tomu u klasických žárovkových světlometů. V další části je popsán postup výroby světlometu, který je z pravidla rozdělen na dvě části. Nejdříve je vytvořen návrh designu světlometu dle zadání zákazníka. Následně designér vytvoří hrubý tvar světlometu s jeho vybavením odpovídajícím zástavbě automobilu. Pokud dojde k vzájemné spolupráci pokračuje se v konstrukčních pracích kde se ladí jednotlivé díly světlometu a vzájemně se upravují jejich prostorové tvary dle potřeb zákazníka, funkčnosti a vyrobitelnosti. Následně jsou na modelu prováděny teplotní a strukturální simulace dokud není dosaženo optimálního výsledku. Pokud světlomet projde všemi simulacemi i reálnými testy může se přejít k výrobě světlometu. Pro tuto diplomovou práci je světlomet volen s ohledem na tzv. RCAR protokol, který se zabývá testováním při nízké rychlosti nárazu do 15 km/h. Tento předpis má umožnit zejména snížení nákladů oprav prováděných na vozidlech po nárazu za nízké rychlosti. V tomto případě se jedná o proces ulomení držáku světlometu, kdy dochází k ulomení v tzv. rupture line, tak aby bylo možné vyměnit pouze držák světlometu.

Druhá část je zaměřena na tvorbu MKP modelu a aplikaci okrajových podmínek při statickém testu. Pro vytvoření konečnoprvkového modelu a následné zadávání okrajových podmínek byl použit SW ANSA. Tento SW má kvalitně a logicky propracované prostředí pro vytvoření konečno prvkové sítě. Je velmi rozšířen v automobilovém průmyslu a má velmi propracované funkce a prostředí pro tvorbu konečnoprvkové sítě a zadávání

okrajových podmínek. ANSA je specifická tím, že tvorba konečnoprvkové sítě je zde rozdělena do dvou kroků. V první řadě se vytvoří povrchová síť tak, aby co nejpřesněji kopírovala tvar zadané součásti. Z takto vytvořené sítě se vygeneruje síť objemová. Výhodou tohoto postupu je ten, že s povrchovou sítí se daleko lépe pracuje. Další výhodou je, že kritéria, která se zadávají pro kontrolu kvality sítě se nastavují pro povrchovou a objemovou síť zvlášť. V této diplomové práci byly užity pro tvorbu sítě elementy tvaru tetraedru. Tyto elementy byly voleny s ohledem na složitost součásti. Pro přesnější chování daného dílu byly pro pouzdro světlometu a část skla použity elementy s meziuzlem. Část auta a šroub s maticí byly užity prvky bez meziuzlu. Kritéria, která byla použita při vytváření MKP sítě jsou uvedena v podkapitole 2.1 Tvorba sítě konečných prvků. Nejprve byla velikost elementů pro celou součást 2mm. V kapitole 4. je následně popsána úprava sítě v oblasti drážky pro ulomení i počet elementů pro jednotlivé varianty výpočtu. Po vytvoření konečnoprvkové sítě jsme mohli přistoupit k zadávání okrajových podmínek. Pro nahrazení zbylé části světlometu byla užita vazba SPC, která se aplikuje na uzly a zabranějí všem rotacím i posuvům. Na uzly zjednodušeného šroubu a matice je také aplikována SPC vazba s tím rozdílem, že je povolen posuv ve směru osy Z viz. Obr. 25. Další vazba byla vytvořena mezi sklem a pouzdrům světlometu, ta nahrazovala lepidlo v drážce mezi držákem a sklem světlometu. Na šroub bylo aplikováno kinematické buzení konkrétně rychlost ve směru osy Y. Rychlost byla nejprve 1m/s následně byla tato rychlost upravována viz. kapitola 5. Předposledním krokem v druhé části bylo nastavení kontaktů. Prvním druhem kontaktů byly tzv. tied kontakt který je vytvořen mezi pevně spojenými součástmi jako je sklo a pouzdro světlometu a pouzdro světlometu s částí karosérie auta viz. obr. 30. Druhým typem kontaktu byl tzv. Automatic kontakt. Ten byl vytvořen mezi součástmi, které se nedotýkají, ale vlivem velkých deformací by mohlo dojít k jejich dotyku. Jeden tento kontakt byl vytvořen mezi pinem pouzdra světlometu a částí auta a další mezi dříkem šroubu a pouzdrům. Posledním krokem bylo zadání materiálů jednotlivých součástí viz tab. 2..

V třetím bodě je popsáno jak pracuje SW LS-DYNA pomocí něž byla optimalizace prováděna. Stručně je vysvětlen přístup implicitního a explicitního řešení úloh.

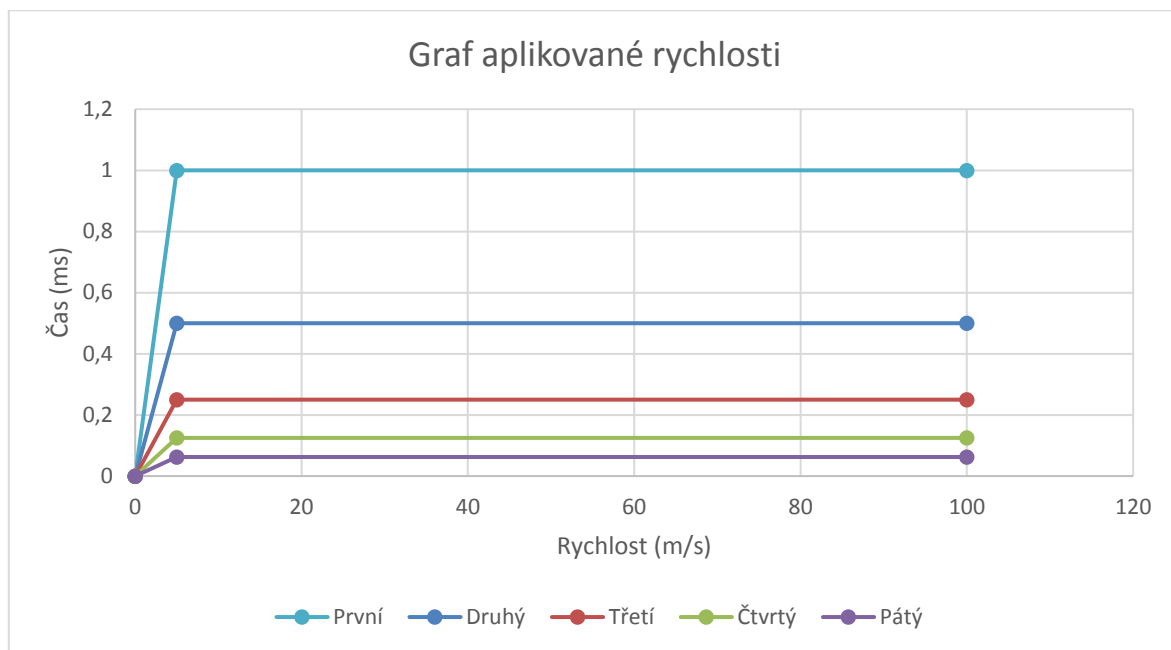
Čtvrtá kapitola popisuje úpravu velikosti sítě na držáku světlometu konkrétně v oblasti drážky, kde dochází k ulomení (tzv. Rupture line) světlometu. V oblasti drážky byla měněna velikost elementu od 1 do 5 mm po 1mm. Tímto způsobem vzniklo prvních pět výpočetních modelů. Díky úpravě velikosti elementu se zvyšoval nebo snižoval počet elementů přehled počtu elementů každého modelu je v tabulce 3. Pro modely s velikostí sítě 1 – 2 mm nebyl problém v kvalitním popsání geometrie, ale pro velikost 3 – 5mm nastal problém, kdy už nebylo možné popsat součást detailně, tak aby odpovídala skutečnému modelu. Největší problém nastal ve spodní části drážky, kde byl na šířku pouze jeden element, jak je vidět na

obr. 39. Na modelech bylo pro porovnání vyhodnocováno napětí, při kterém dojde k ulomení a síla potřebná pro ulomení. První model by nám měl poskytnout nejpřesnější výsledky. Napětí se zde hezky šířilo v drážce pro prasknutí než došlo k ulomení, hodnota napětí při prasknutí byla 40 MPa. Síla při které došlo k ulomení byla 923N. Z průběhu síly obr. 41 můžeme vidět jak síla pěkně narůstala než došlo k ulomení. U druhé výpočetní varianty pro velikost sítě 2mm došlo k ulomení v místě drážky, ale z důvodu hrubší sítě v místě drážky dochází k většímu ohybu v místě, kde je packa napojena na pouzdro světloometu obr. 44. Na obr. 45 lze vidět nárůst síly, která z důvodu ohybu součásti byla navýšena na hodnotu 1179 N, ale při této hodnotě k prasknutí nedošlo a k ulomení došlo při hodnotě 972 N. U třetího modelu pro 3mm síť již nešlo oblast drážky popsat dvěma elementy na šířku, což je z výpočetního hlediska nevhodné obr.39. Díky větším elementům došlo i ke vzniku ostrých hran. Díky kterým vznikala koncentrace napětí v tomto místě viz. Obr. 46. U výpočetní varianty pro elementy 4 a 5 mm již došlo ke špatnému šíření napětí. Na obr. 48 – 49 lze vidět, že dojde k šíření napětí do oblasti mřížky u šroubu. Energie se kvůli velkým elementům přenesla do oblasti šroubu. Při této velikosti elementu již nelze zachytit průběh ulomení packy. V tomto místě následně dojde k vylomení kusu packy, které neodpovídá reálnému ulomení.

Varianta sítě	Napětí [MPa]	Síla [N]	Čas ulomení [ms]
1 mm	40.1	923	11
2mm	37.8	1179	10
3 mm	39.5	1477	13
4mm	39.4	1345	12
5mm	39	750	9

Tab. 4 Hodnoty napětí, síla a čas ulomení

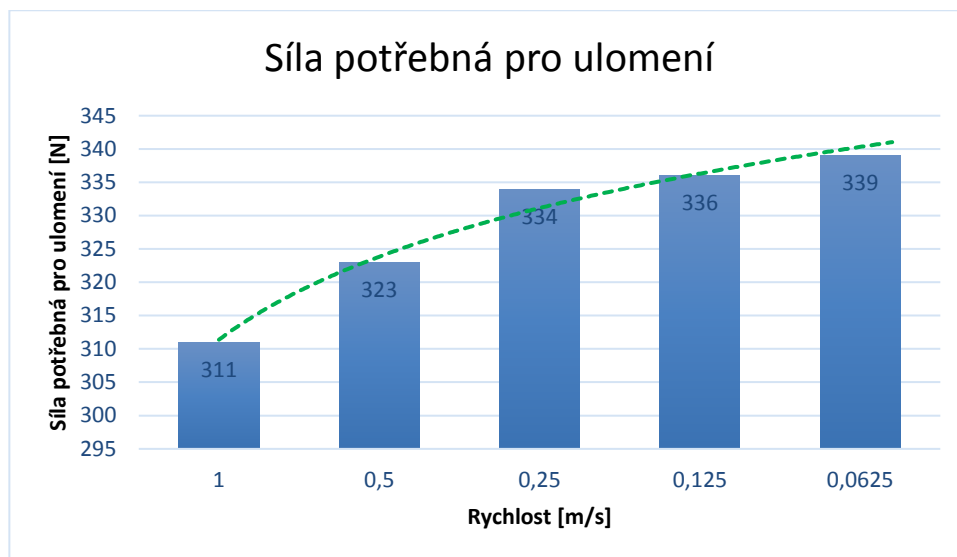
Ve čtvrtém kroku bylo nutné nejdřív předefinovat chování materiálu. V první sérii výpočtů byly použity křivky materiálu pro dynamické chování materiálu, ale v tomto případě byl materiál již definován pouze statickou křivkou. Druhý krok bylo snižování rychlosti aplikované na šroub. První výpočet se počítal pro rychlost 1m/s jako u předchozího kroku s tím rozdílem, že materiál byl definován již zmíněnou statickou křivkou. Následně byla hodnota rychlosti snížena na polovinu, čtvrtinu, osminu a šestnáctinu svojí velikosti. Snižování rychlosti se bohužel prodlužuje i výpočetní čas tudíž bylo úkolem najít optimum mezi výpočetním časem a utlumením dynamických efektů.



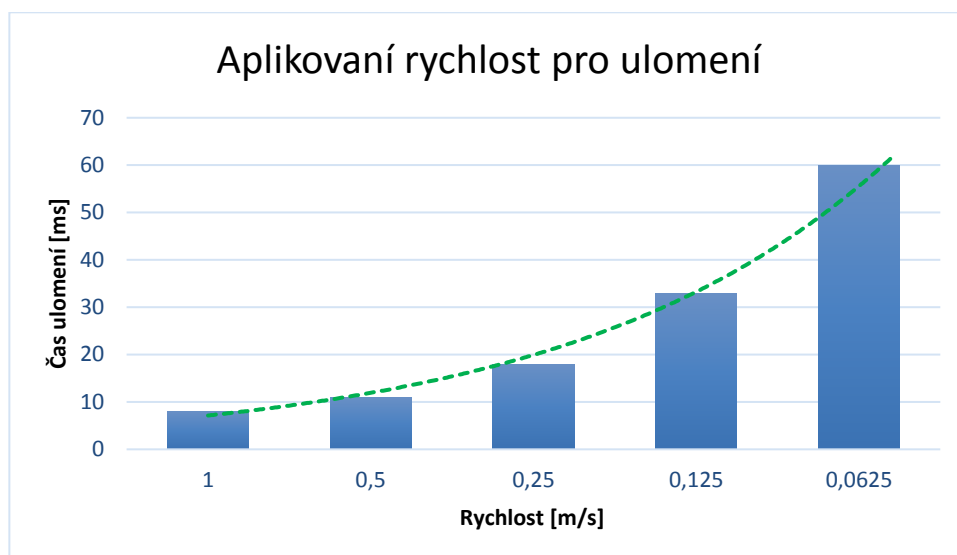
Graf 1. Snižování rychlosti

Jelikož je materiál definován pouze jednou křivkou, docházelo k ulomení držáku vždy při stejné hodnotě napětí 11.4 MPa. Měnila se ale síla potřebná pro ulomení a také narůstal čas, v kterém došlo k ulomení. U prvního výpočtu pro rychlost 1m/s můžeme zaznamenat největší změny oproti předchozímu výpočtu. Síla se změnou křivky definující materiál snížila s 923N na 311N došlo také ke zkrácení doby kdy dojde k ulomení s 11ms na 8ms. U tohoto modelu můžeme sledovat jaký vliv má změna materiálu na hodnotu napětí, sílu potřebnou pro ulomení a délku času pro ulomení.

U druhého modelu pro rychlost 0.5 m/s můžeme sledovat malý nárůst času, kdy dojde k ulomení oproti předchozímu modelu 2ms, ale velký rozdíl v síle potřebné síle pro ulomení 12 N. U třetího výpočtu pro rychlost 0.25 m/s můžeme sledovat již větší nárůst času, kdy dojde k ulomení dojde o 7ms později. Změna síly byla opět velká a to 11 N. Až mezi třetím a čtvrtým výpočtem došlo k menšímu rozdílu síly a to pouze 2 N. Čím byla rychlost nižší tím se prodlužoval čas pro ulomení. Od třetího výpočtu pro rychlost 0.25 m/s již nedocházelo k velkému zpřesnění výsledků. Jelikož mezi teoreticky nejpřesnějším výpočtem pro nejnižší rychlost 0.0625 m/s a třetím výpočtem pro rychlost 0.25 m/s změna v síly pouze necelé dvě procenta budeme nadále vycházet z třetího výpočtu. Jelikož rozdíl času ulomení se neúměrně zvyšoval v závislosti na síle potřebné pro ulomení. Rozdíl je 42 ms. Dle výsledků se nejlépe jeví třetí výpočet pro rychlost $v=0.25$ m/s. Chyba vnesena do výpočtu je minimální, ale úspora času velká.



Graf 2. Závislost aplikované rychlosti na síle potřebné pro ulomení



Graf 3. Závislost aplikované rychlosti na výpočetním čase

V pátém bodě došlo k úpravě měrné hmotnosti. Tato úprava výpočtu je spojena s kritickou hodnotou časového kroku. Zkrácení výpočetního času lze dosáhnout při stejné velikosti i počtu elementu za pomoci vložení do výpočtu „nefyzické” hmoty. Ovšem přidáním takovéto hmoty do výpočtu u dynamických dějů může ovlivnit výsledné hodnoty. Zvýšením hmotnosti vzroste hustota a také délka časového kroku. Dojde ale k ovlivnění chování modelu, zejména pak s ohledem na setrvačné účinky při simulacích dynamických jevů. Maximální navážení modelu v průběhu výpočtu by tedy nemělo překročit povolenou mez (cca 5 – 10%). Pro tuto součást vážící 143g to znamená 7g. Automaticky nastavená hodnota DT2MS byla $-8 \cdot 10^{-5}$. Následně jsem hodnotu snížil na $-1 \cdot 10^{-4}$ přidaná hmota byla $0.29030 \cdot 10^{-6}$ tudíž jsme stále byli v limitu. Dále jsem opět hodnotu snížil o řád a hmota byla výrazně navýšena o 2.8 kg. Z tohoto vyplývalo, že ideální hodnota bude ležet někde mezi hodnotami $-1 \cdot 10^{-4}$ a $-1 \cdot 10^{-3}$. Posledním

krokem bylo tedy zjistit optimální hodnotu DT2MS tak abychom nepřesáhli maximální přidanou hmotu 8g a porovnat výsledky zdali nedochází k negativním vlivům díky této hmotě. Výsledkem byla hodnota -45 E-4 , která přidala k modelu hmotu vážící 7.6g. Díky této úpravě došlo ke zrychlení výpočtu, aniž by došlo k výraznému ovlivnění výsledků. Síla potřebná pro ulomení klesla pouze o 1N. Tuto změnu mohla zapříčinit změna výpočtu kroku tím, že daný krok pro sílu 333N byl vynechán. Stejným způsobem došlo i k změně napětí.

Výsledky získané v této diplomové práci budou prezentovány specialistům ve společnosti VLS a bude se diskutovat nad možností změny dosavadních výpočetních specifikací. Dle výsledků je patrné, že při prvním kroku optimalizace má zásadní vliv velikost sítě od 3 mm, kdy dochází k většímu zjednodušení modelu které je pro řešený problém nevhodné. Pro další vývoj bych se pokusil provést stejnou optimalizaci s velikostí elementu 2mm. Pro optimalizaci rychlosti deformace je vhodné aplikovat rychlost $v = 0.25 \text{ m/s}$. Pro tuto rychlost se výrazně neliší potřebná síla pro ulomení oproti nejpřesnějšímu modelu pro rychlost $v = 0.0625 \text{ m/s}$ rozdíl je pouze 2%. Naproti tomu dojde k ulomení o 41 ms dříve než u nejpřesnějšího modelu což je velká časová úspora. Poslední krok optimalizace který upravuje hustotu nejmenších elementů pro rychlejší časový krok vyšla jako ideální hodnota $\text{DT2MS} = -45 \text{ E-4}$. S tímto krokem optimalizace je nutné být velmi opatrný a kontrolovat jej při každém dalším výpočtu jelikož v modelu může být schován nějaký malý element a ten může skokově navýšit přidanou hmotu.

8. Seznam použité literatury

- [1] Varroc Lighting System, s.r.o. [online]. 2016 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <https://www.varroclighting.com/aboutUs/SitePages/History.aspx>
- [2] BEDNÁŘ, Marek. Jak se vyvíjela světla aut: od acetylenu po lasery. Autoforum.cz [online]. 2015 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/jak-se-vyvijela-svetla-aut-od-acetylenu-po-lasery/>
- [3] Auto.cz. Wwww.auto.cz [online]. [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/historie-a-budoucnost-automobiloveho-osvetleni-od-svicky-k-laseru-79316/foto?foto=1>
- [4] LAŽANSKÝ, Milan. [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/do-aut-se-ted-montuji-ctyri-typy-svetlometu-vyznate-se-v-nich>
- [5] Help System: ANSA version 17.0.3. BETA CAE Systems: On-line reference manual [online]. Customer Service & Support, 2017 [cit. 2018-03-14]
- [6] Metoda konečných a hraničních prvků.pdf [online]. 2013 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z WWW: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicnich_prvk_u.pdf
- [7] Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [8] DYNAPRODUCTS. LS-Prepost.DYNAmore [online]. ©2016, [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <https://www.dynamore.de/en/products/prepost>